

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Experimentální výzkum syntetizovaných proudů laserovými anemometriemi

An experimental research of synthetic jets using laser anemometries

Diplomová práce

Autor:	Michal Gruncel
Vedoucí práce:	Prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
Konzultant:	Ing. Lucie Pírková

V Liberci 18. 5. 2007

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 18.5.2007

.....
Michal Gruncl

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Prof. Ing. Václavu Kopeckému, CSc. za cenné rady, připomínky, trpělivost a ochotu během vedení mé diplomové práce. Dále děkuji konzultantce Ing. Lucii Pírkové za pomoc při přípravě experimentu, samotném měření a zpracování diplomové práce. Poděkování také patří celé mé rodině, přátelům a všem, kteří mě podporovali během celého studia.

Anotace

Cílem diplomové práce je experimentální výzkum syntetizovaných proudů laserovými anemometriemi. Práce popisuje výběr metody PIV pro měření nestacionárních proudových polí, její princip a limity, vlastnosti a možné aplikace syntetizovaných proudů. Dále zkoumá možnosti aktivního řízení toku tekutiny syntetizovanými proudy v ústí trysky.

Annotation

The main aim of the diploma thesis is an experimental research of synthetic jets using laser anemometries. The report describes the reason of choice PIV method for unsteady flow-field measuring, its principle and limits, features and possible applications of the synthetic jets. Sequentially describes the research of active flow control using synthetic jet's actuators at the jet nozzle exit.

Obsah

1 Úvod	13
2 Metoda PIV	14
2.1 Základní princip metody PIV	14
2.2 Zpracování PIV obrazů	17
2.3 Systematické chyby a omezení metody PIV	19
2.3.1 Ztracené páry	19
2.3.2 Maximální posunutí částic.....	19
2.3.3 Hustota sycení částic	20
2.3.4 Dynamický rozsah.....	21
2.3.5 Stopovací částice.....	22
3 Syntetizovaný proud	23
3.1 Vznik syntetizovaných proudů	23
3.2 Výhody a použití syntetizovaných proudů	24
4 Příprava měření	25
4.1 Popis a zapojení zařízení	25
4.2 Synchronizace měřené soustavy s měřícím systémem	29
4.3 Nastavení parametrů zařízení.....	30
5 Zpracování dat a popis měření.....	31
5.1 Zpracování záznamů.....	31
5.1.1 Vzájemná korelace a validační metody.....	32
5.1.2 Vizualizace PIV záznamů	35
5.2 Popis měření	38
5.2.1 Mód A.....	39
5.2.2 Mód B	40

5.2.3 Múd C.....	41
5.2.4 Múd D.....	42
6 Výsledky měření.....	43
6.1 Múd A - bifurkační	43
6.2 Múd B – osově symetrický v jedné rovině.....	49
6.3 Múd C – osově symetrický.....	54
6.4 Múd D.....	59
7 Závěr	64
Seznam použité literatury.....	65

Seznam symbolů a zkratek

D	[mm]	průměr trysky
d_l	[mm]	strana vyhodnocované oblasti
D_{\max}	[mm]	maximální posunutí v obrazové rovině
d_{pixel}	[mm]	rozteč mezi sousedními pixely
M		transformace mezi obrazovou a objektovou rovinou
N_{int}	[px]	počet pixelů strany vyhodnocované oblasti
R	[mm]	vzdálenost od osy trysky
R/D		vzdálenost od osy trysky vztažená na průměr trysky
R_a	[ms ⁻¹]	dynamický rozsah
R_C		konvoluce průměrných intenzit
R_D		korelační vrchol
R_e		Reynoldsovo číslo
R_F		složka fluktuačního šumu
s_a		vektor průměrného posunutí částic
T	[s]	perioda buzení reproduktorů
v	[ms ⁻¹]	okamžitá rychlost
v_{\max}	[ms ⁻¹]	vektor maximální rychlosti v objektové rovině
v_{\min}	[ms ⁻¹]	vektor minimální rychlosti v objektové rovině
v_x, v_y	[ms ⁻¹]	složky vektoru rychlosti v objektové rovině
X	[mm]	výška nad tryskou
X/D		výška nad tryskou vztažená na průměr trysky
Δt	[s]	časový interval mezi prvním a druhým záznamem
$\Delta x, \Delta y$	[mm]	posunutí částic v objektové rovině za čas Δt v ose x, y
$\Delta X, \Delta Y$	[mm]	posunutí částic v obrazové rovině za čas Δt v ose x, y

kap.	kapitola
LDA	Laser Doppler Anemometry
např.	například
PIV	Particle Image Velocimetry
resp.	respektive

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obrázky:

Obr. 2.1-1	Uspořádání metody PIV	15
Obr. 2.1-2	Transformace objektové roviny do obrazové a rozdělení obrazové roviny na vyhodnocované oblasti	15
Obr. 2.1-3	Příklad vektorové mapy	16
Obr. 2.2-1	Výsledek analýzy obrazu metodou vzájemné korelace	17
Obr. 2.2-2	Postupné zpracování PIV obrazu metodou vzájemné korelace	18
Obr. 2.3-1	Chyba průměrného posunutí částic pro vzájemnou korelaci v závislosti na hustotě sycení	21
Obr. 3.1-1	Jeden pracovní cyklus zařízení Synthetic Jet	23
Obr. 4.1-1	Zařízení pro řízení toku tekutiny	25
Obr. 4.1-2	Řez zařízením pro řízení toku tekutiny	26
Obr. 4.1-3	Zapojení rotametrů a generátoru částic	27
Obr. 4.1-4	Generátor částic	28
Obr. 4.1-5	Rotametry a barometry	28
Obr. 4.2-1	Synchronizace jednotlivých zařízení	29
Obr. 5.1-1	Příklad záznamu obrazu v podobě bitmapy	31
Obr. 5.1-2	Příklad vektorové mapy po aplikaci metody vzájemné korelace	32
Obr. 5.1-3	Vektorová mapa po aplikaci metody validace rozsahu	33
Obr. 5.1-4	Vektorová mapa po aplikaci metody validace rozsahu bez zobrazení chybných vektorů	34
Obr. 5.1-5	Vektorová statistika	35
Obr. 5.1-6	Skalární mapa rychlosti	36
Obr. 5.1-7	Skalární mapa vířivosti	36
Obr. 5.1-8	Texturová mapa	37

Obr. 5.1-9 Kombinace mapy rychlostí a vektorové statistiky	38
Obr. 5.2-1 Směr proudění tryskami v módu A	39
Obr. 5.2-2 Buzení reproduktorů módu A	39
Obr. 5.2-3 Směr proudění tryskami v módu B	40
Obr. 5.2-4 Buzení reproduktorů módu B	40
Obr. 5.2-5 Směr proudění tryskami v módu C	41
Obr. 5.2-6 Buzení reproduktorů módu C	41
Obr. 5.2-7 Směr proudění tryskami v módu D	42
Obr. 5.2-8 Buzení reproduktorů módu D	42
Obr. 6.1-1 Fotografie proudění při zapojení reproduktorů podle módu A	43
Obr. 6.1-2 Porovnání laminárního a turbulentního proudění módu A	44
Obr. 6.1-3 Vývoj laminárního proudění módu A	45
Obr. 6.1-4 Vývoj turbulentního proudění módu A	46
Obr. 6.2-1 Fotografie proudění při zapojení reproduktorů podle módu B	49
Obr. 6.2-2 Porovnání laminárního a turbulentního proudění módu B	50
Obr. 6.2-3 Vývoj laminárního proudění módu B	51
Obr. 6.2-4 Vývoj turbulentního proudění módu B	52
Obr. 6.3-1 Záznam proudění módu C v podobě bitmapy	54
Obr. 6.3-2 Časový průběh proudění při módu C laminárního a turbulentního proudění	55
Obr. 6.3-3 Vývoj laminárního proudění módu C	56
Obr. 6.3-4 Vývoj turbulentního proudění módu C	57
Obr. 6.4-1 Záznam proudění módu D v podobě bitmapy	59
Obr. 6.4-2 Časový průběh proudění při módu D laminárního a turbulentního proudění	60
Obr. 6.4-3 Vývoj laminárního proudění módu D	61
Obr. 6.4-4 Vývoj turbulentního proudění módu D	62

Grafy:

Graf 6.1-1 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu A	48
Graf 6.1-2 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu A	48
Graf 6.1-3 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu A	49
Graf 6.1-4 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu A	49
Graf 6.2-1 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu B	54
Graf 6.2-2 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu B	54
Graf 6.3-1 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu C	59
Graf 6.3-2 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu C	59
Graf 6.4-1 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu D	64
Graf 6.4-2 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu D	64

Tabulky:

Tab. 4.3-1 Parametry zařízení	31
-------------------------------	----

1 Úvod

V době čím dál dokonalejších modelovacích technik má pořád převahu zkoumání daného děje v reálném prostředí se skutečným objektem nad simulováním děje pomocí virtuálního modelu. Sebelepší software ve spojení se stále výkonnější výpočetní technikou neposkytuje tak přesné informace o složitých dějích jako reálné měření. K tomu je zapotřebí stále se rozvíjejících moderních technik, které jsou schopny zachytit potřebné objemy dat s vyhovující kvalitou a rychlostí zpracování.

Tato práce se zabývá výzkumem nestacionárního proudění tekutin a řízením toku tekutiny pulzními proudy, pro který je důležité vhodně zvolit metodu, jež poskytne vyhovující popis zkoumaného děje. Existují kontaktní a bezkontaktní metody, pro tuto práci však kontaktní metody nejsou vhodnou volbou z důvodu značného porušení toku tekutiny. Z bezkontaktních metod byla vybrána jedna z nejkompexnějších, metoda PIV.

Pro použití této laserové anemometrie je zapotřebí důkladného a náročného studia. Bez teoretických znalostí není možné provádět měření, která by přinesla věrohodné výsledky. Studium je zaměřeno jak na samotný princip metody, tak i na práci se zařízením a na zpracování naměřených data, jelikož nastavení každého parametru experimentu může značně ovlivnit získané výsledky.

V diplomové práci je obsažen popis zvolené metody, její limity, přednosti a parametry, konstrukce trysky, nastavení celého experimentu, dále popis zpracování naměřených dat a následně také zhodnocení dosažených výsledků.

2 Metoda PIV

Aby bylo možno důkladně a přesně prostudovat chování proudění tekutiny, je vhodné zvolit bezkontaktní měřicí metodu. Kontaktní metody svou sondou porušují proudění a ovlivňují tak jeho chování. I pokud by byla měřicí sonda dostatečně malá, aby porušení proudění bylo zanedbatelné, je nutné pro zkoumání složitějších proudových polí opakovat měření po celé zkoumané oblasti. Z výše uvedených důvodů bylo vybíráno z bezkontaktních metod.

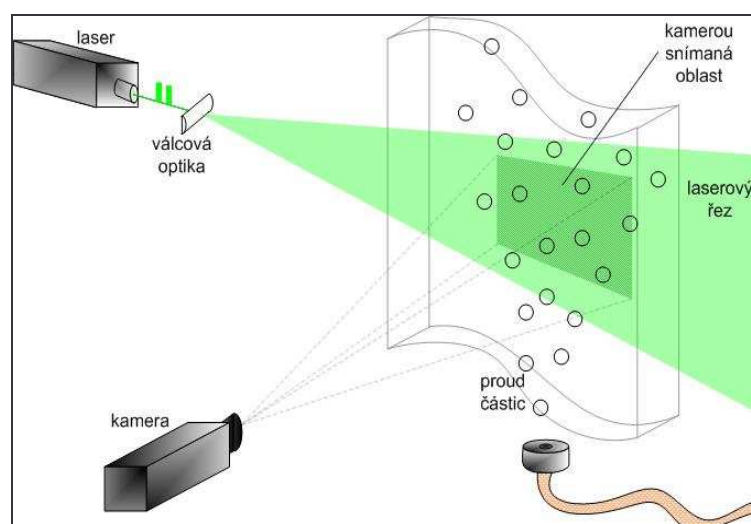
Jednou z takových je bodová metoda LDA (Laser Doppler Anemometry), jejíž princip je založen na Dopplerově jevu. V tomto případě pohybující se částice unášená proudem tekutiny rozptyluje laserové záření na ni dopadající. Toto na částicích rozptýlené záření má jinou frekvenci než je frekvence záření laserového. Posunutí frekvence rozptýleného záření je přímo úměrné rychlosti částice. Metoda měří rychlosti pouze v malé oblasti a zpracování naměřených dat je velmi složité (obtížná vizualizace).

Druhá metoda, kterou se nabízí použít, je metoda PIV (Particle Image Velocimetry). Do češtiny se název překládá jako rovinná laserová anemometrie. Z tohoto překladu je zřejmé, že tato metoda měří rychlosti proudění v dané rovině a je tedy vhodná k měření komplikovaných proudových polí. Díky této vlastnosti byla metoda PIV zvolena pro zadaný výzkum.

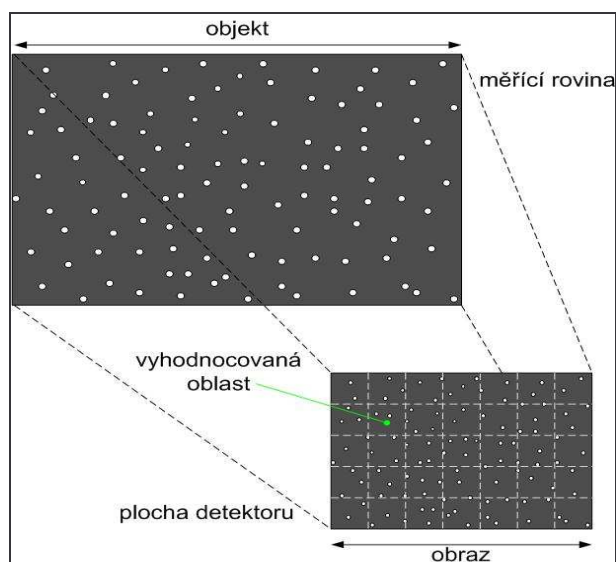
2.1 Základní princip metody PIV

Metoda PIV zaznamenává posunutí malých částic unášených proudem a následně vyhodnocuje tento posuv. Na obr. 2.1-1 je jednoduše znázorněno typické uspořádání měření. Aby bylo možné zaznamenat posunutí částic, je nutné proud s částicemi osvětlit dvěma nebo několika krátkými pulsy laserového záření s přesně definovaným časovým

odstupem. Speciální optikou je toto záření modelováno do osvětlující roviny a paprsek tak vytváří laserový řez. Tento řez definuje objektovou rovinu kamery, která se promítne do obrazové roviny CCD detektoru kamery. Tuto transformaci určuje zvětšení M , pro které platí $M = \text{obraz} / \text{objekt}$.



Obr. 2.1-1 Uspořádání metody PIV



Obr. 2.1-2 Transformace objektové roviny do obrazové a rozdělení obrazové roviny na vyhodnocované oblasti

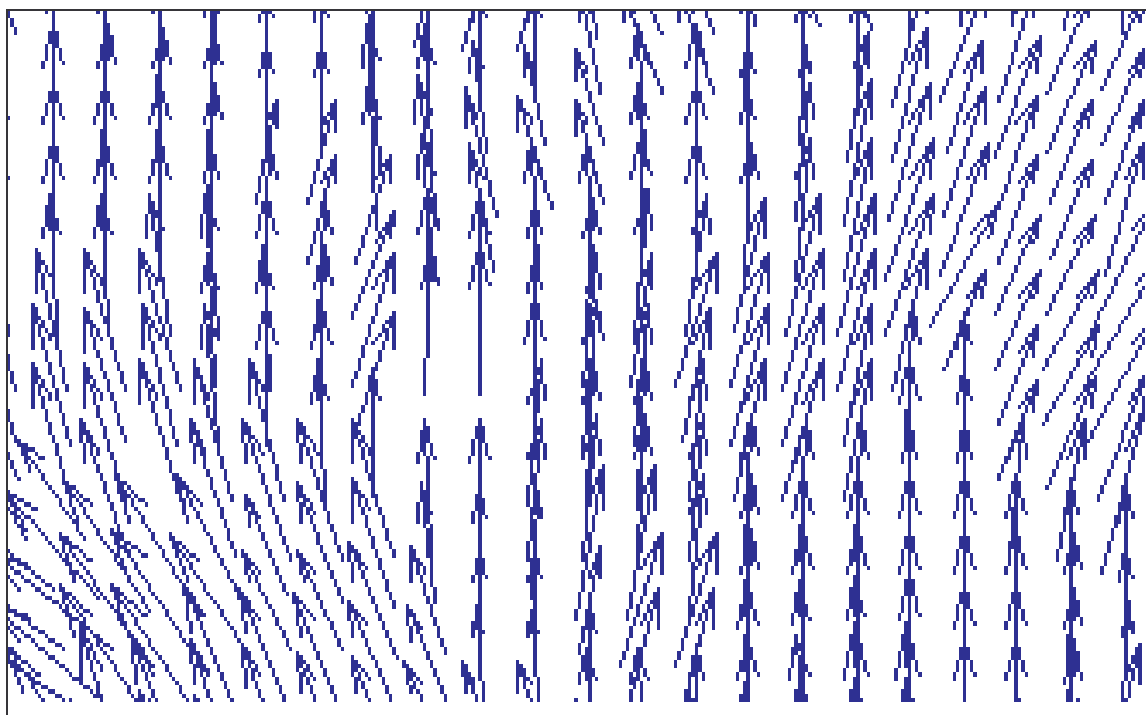
Obraz je po transformaci rozdělen na pravoúhlé (čtvercové) vyhodnocované oblasti, jak je znázorněno na obr. 2.1-2. V každé z těchto oblastí je určeno průměrné posunutí částic. Označme si posunutí částic ve vodorovném směru objektové roviny Δx a ve svislém Δy a jim odpovídající posunutí v obrazové rovině ΔX a ΔY . Je-li také definováno zvětšení M , potom platí:

$$\Delta x = \frac{1}{M} \Delta X \text{ a } \Delta y = \frac{1}{M} \Delta Y. \quad (2.1-1)$$

Pokud je přesně dán časový interval mezi jednotlivými záznamy Δt , získáme pro výpočet složek rychlostí rovnice:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ a } v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}. \quad (2.1-2)$$

Po výpočtu vektorů rychlostí podle rovnic (2.1-2) v jednotlivých vyhodnocovaných oblastech se souhrn výsledků často prezentuje jako vektorové mapy, jak je znázorněno na obr. 2.1-3.

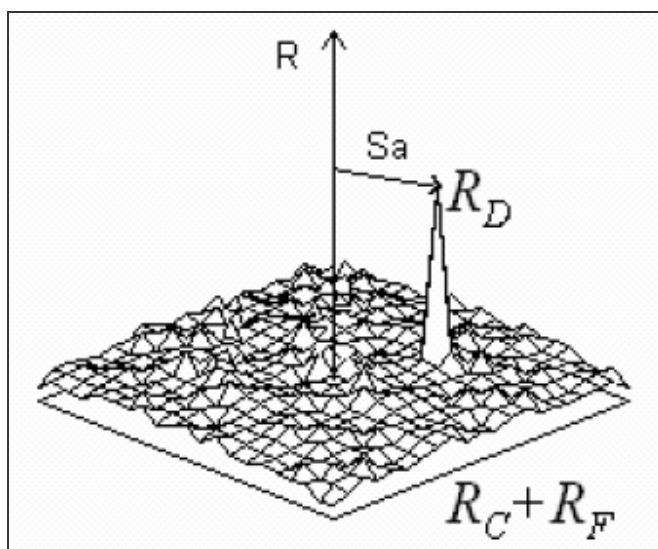


Obr. 2.1-3 Příklad vektorové mapy

2.2 Zpracování PIV obrazů

Záznam obrazu je možný dvěma způsoby a to buď dvojnásobnou expozicí nebo jednotlivými expozicemi. Při dvojnásobné expozici je první i druhý záznam exponován do jednoho obrazu - v jednom obrazu jsou počáteční i koncové polohy částic. Technika vhodná pro výpočet průměrného posunutí částic je autokorelace. Při jednotlivé expozici dostáváme dva záznamy – jeden s počátečními polohami částic, druhý s koncovými polohami částic. Určení průměrného posunutí částic se v tomto případě provádí technikou vzájemné korelace. Princip obou technik je důkladně popsán v [2].

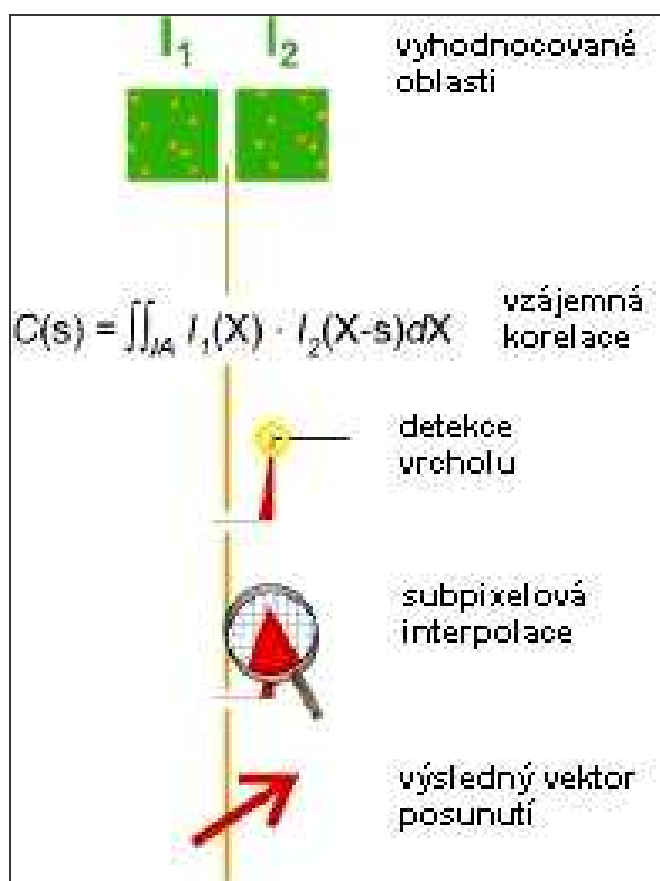
Typickým výsledkem vzájemné korelace (jednotlivé expozice) obrazů ve vyhodnocované oblasti je obr. 2.2-1.



Obr. 2.2-1 Výsledek analýzy obrazu metodou vzájemné korelace [7]

Vzájemnou korelaci získáme pouze jeden vrchol R_D . Průměrné posunutí částic pak určuje vzdálenost s_a , což je vzdálenost vrcholu R_D od středu korelační roviny vyhodnocované oblasti. Součet $(R_C + R_F)$ představuje korelační šum.

Obr. 2.2-3 znázorňuje postup zpracování celého PIV záznamu metodou vzájemné korelace. V první řadě je nutné pořídit kvalitní záznamy, aby mohl celý postup vést k přijatelnému výsledku. Následně je na digitální záznam aplikována samotná funkce vzájemné korelace a detekce vrcholu v korelační mapě. Aby nalezení nejvyššího bodu vrcholu bylo co nejpřesnější, je zapotřebí aplikovat na dosud získaná data metodu subpixelové interpolace. Ta roztáhne celý vrchol a přesněji se tak určí šířka, výška a poloha vrcholu v korelační rovině. Jako poslední se provede výpočet souřadnic vektorů rychlosti a vektory jsou zaneseny do vektorové mapy, na kterou jsou ještě aplikovány validační metody.



Obr. 2.2-2 Postupné zpracování PIV obrazu metodou vzájemné korelace[7]

2.3 Systematické chyby a omezení metody PIV

Jako každá metoda i metoda PIV má svá omezení, která vycházejí z vlastního principu metody. Je proto důležité předem si uvědomit, jaký děj je třeba měřit, a nastavit tak celý měřicí aparát. Níže jsou jednotlivé chyby a limity metody uvedeny.

2.3.1 Ztracené páry

Doposud bylo předpokládáno, že počáteční i koncová poloha částic byla zaznamenána ve stejné vyhodnocované oblasti. V reálu ale není možné tohoto stavu docílit. Vždy se najde částice, která má pouze jeden obraz ve vyhodnocované oblasti a nemá odpovídající protějšek do páru. Buď v časovém intervalu mezi snímky částice opustila vyhodnocovanou oblast, anebo se do záznamu při druhém snímku dostala částice z jiné vyhodnocované oblasti. Pravděpodobnost ztracení svého protějšku je vyšší u rychlejších částic, které mají větší posun, a to má za následek zvyšování korelačního šumu a stahování průměrné rychlosti v dané vyhodnocované oblasti k nule. Technika, která do jisté míry eliminuje tuto systematickou chybu metody, je překrývání vyhodnocovaných oblastí (podrobněji v [2]).

2.3.2 Maximální posunutí částic

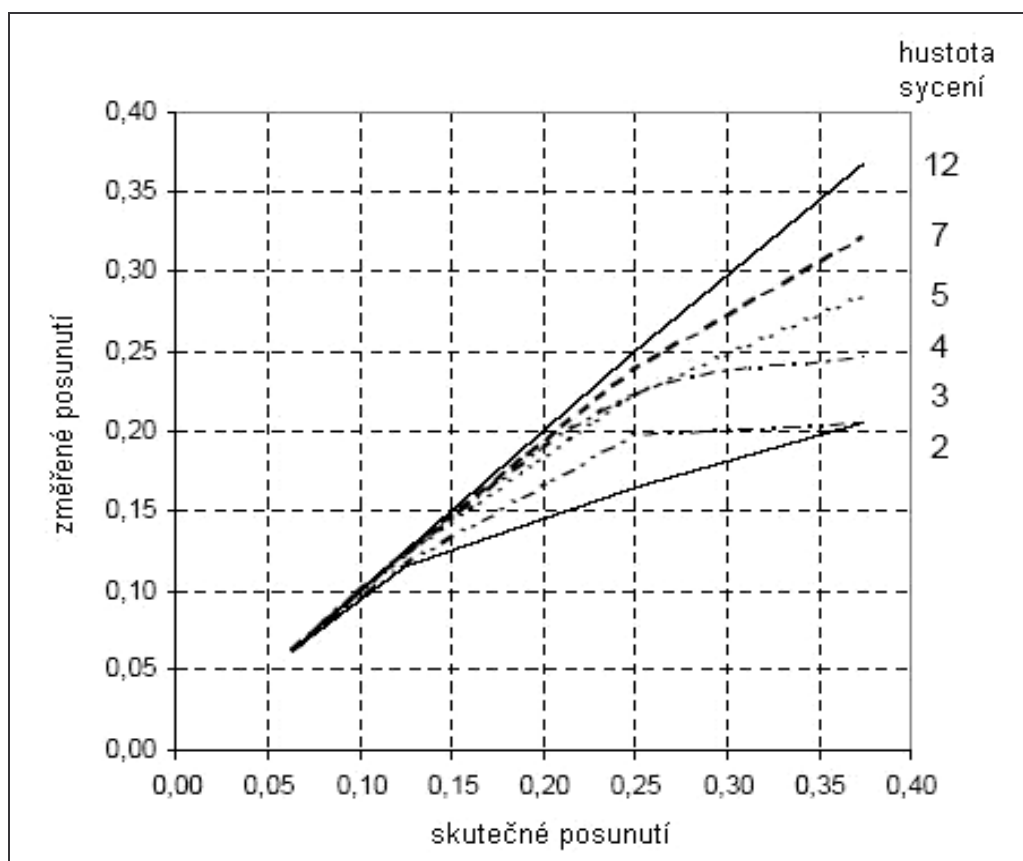
Jedním z limitujících parametrů metody PIV je maximální posunutí částic. Z Nyquistova vzorkovacího kritéria spojeného s Fourierovou transformací vychází předpoklad, že by posunutí v libovolném směru nemělo překročit polovinu vyhodnocované oblasti, ale aby se zamezilo nadměrnému počtu „ztracených párů“, je tato mez také pro správné zpracování PIV záznamu příliš velká. Z teoretických rozborů je doporučeno dodržet maximální posunutí pod jednu čtvrtinu strany vyhodnocované oblasti, jak ukazuje rovnice (2.3-1).

$$|D_{\max}| = |v_{\max}| \Delta t M \leq \frac{d_l}{4} = \frac{N_{\text{int}} d_{\text{pixel}}}{4} \quad (2.3-1)$$

D_{\max}	maximální posunutí v obrazové rovině
v_{\max}	vektor maximální rychlosti v objektové rovině
Δt	časový interval mezi prvním a druhým záznamem
M	zvětšení
d_l	strana vyhodnocované oblasti
N_{int}	strana vyhodnocované oblasti v pixelech
d_{pixel}	rozteč mezi sousedními pixely

2.3.3 Hustota syčení částic

Dalším důležitým parametrem ovlivňujícím odstup signálu od šumu je počet sytících částic ve vyhodnocované oblasti. Efektivním nástrojem pro stanovení tohoto přiměřeného počtu sytících částic je počítačová simulace Monte Carlo. Na obr. 2.3-1 je znázorněn typický výsledek simulace pro vzájemnou korelaci. Jak je vidět, příliš malé syčení částicemi může být zdrojem výrazných chyb. Vypočtená rychlost je proti skutečné rychlosti menší. Chyba také roste současně s rostoucím průměrným posunutím. Na základě simulací byly stanoveny minimální doporučené počty částic ve vyhodnocované oblasti. Pro vzájemnou korelaci je doporučeno 5 částic ve vyhodnocované oblasti a pro autokorelaci je doporučeno částic 10.



Obr. 2.3-1 Chyba průměrného posunutí částic pro vzájemnou korelaci v závislosti na hustotě sycení [7]

2.3.4 Dynamický rozsah

Měřitelný dynamický rozsah R_a je dán rozdílem maximální měřitelné rychlosti v_{max} a minimální měřitelné rychlosti v_{min} podle rovnice (2.3-2). Protože je proudění reverzibilní, vektor minimální měřitelné rychlosti je vlastně vektor maximální měřitelné rychlosti v opačném směru k vektoru maximálního posunutí.

$$R_a = |v_{max} - v_{min}| \quad (2.3-2)$$

Pro použití vzájemné korelace platí, že vektor maximální měřitelné rychlosti je stejně velký jako vektor minimální měřitelné rychlosti, ale s opačným znaménkem. Jak bylo výše zmíněno, je vektor maximálního posunutí D_{max} velký nejvýše jednu čtvrtinu délky vyhodnocované oblasti d_l podle vzorce (2.3-3).

$$|D|_{max} = \frac{d_l}{4} \quad (2.3-3)$$

Dosazením vztahu (2.3-3) do rovnice (2.3-2) získáme absolutní dynamický rozsah R_a pro vzájemnou korelaci ve tvaru:

$$R_a = 2|v_{max}| = \frac{2|D_{max}|}{\Delta t M} = \frac{d_l}{2\Delta t M}. \quad (2.3-4)$$

2.3.5 Stopovací částice

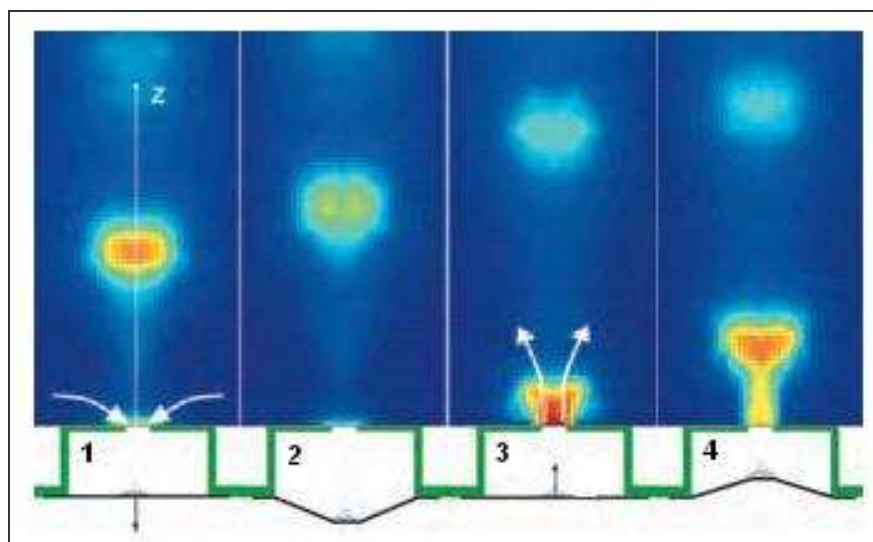
Ze základního principu vyplývá, že metodou PIV neměříme skutečnou rychlost proudění, ale rychlost stopovacích částic unášených proudem tekutiny. Proto mají vlastnosti částic zásadní vliv na kvalitu měření. Částice by měly být dostatečně malé, aby dobře sledovaly proud, na druhou stranu zase tak velké, aby na svém povrchu dostatečně rozptylovaly laserové záření a bylo tak možné zaznamenat jejich polohu kamerou. Dalšími vlastnostmi částic by měly být nízké pořizovací náklady, vhodný způsob jejich generování, měly by být netoxické, nekorozní, nezpůsobující erozi, netěkavé, slabě se vypařující, chemicky netečné, pokud možno také homogenní a monodisperzní.

3 Syntetizovaný proud

V druhé polovině 20. století se věda začala zajímat o zvláštní typ proudění tekutin nazývaný anglicky „Synthetic Jet“. Do češtiny se tento termín překládá jako „syntetizovaný proud“. Překlad „syntetický proud“ je zavádějící a není používán, jelikož evokuje představu jakéhosi umělého proudu tekutiny. Pojem „syntetizovaný proud“ se používá k označení proudu tekutiny vzniklého skládáním („syntézou“) několika po sobě jdoucích pulzů tekutiny, a proto se také někdy místo syntetizovaný proud používá pojem pulzní proud.

3.1 Vznik syntetizovaných proudů

Syntetizované proudy jsou tekutinové proudy generované periodickým pulzováním tekutiny, která je cyklicky nasávána a vyfukována otvorem (tryskou). V otvoru je časově střední průtok nulový, ale v dostatečně vzdáleném místě v ose trysky způsobuje posloupnost výfuků nenulový tekutinový proud „syntetizovaný“ z periodického pulzování.



Obr. 3.1-1 Jeden pracovní cyklus zařízení Synthetic Jet [8]

Na obr. 3.1-1 je znázorněn jeden pracovní cyklus zařízení využívajícího syntetizovaného proudu. V první fázi se membrána pohybuje proti směru výfuku tekutiny a dostává se z počáteční polohy 1 do krajní polohy 2. Během tohoto děje dochází k nasávání okolní tekutiny do dutiny akčního členu. V druhé fázi se membrána dostává přes počáteční polohu do druhé krajní polohy 4 a během tohoto děje se nasátá tekutina vyfukuje ven z otvoru akčního členu. Při návratu do počáteční polohy je opět okolní tekutina nasávána zpět. Celý děj se několikrát cyklicky opakuje a dává tak vzniknout syntetizovanému proudu.

3.2 Výhody a použití syntetizovaných proudů

Z popisu vzniku vyplývá jedna z výhod použití syntetizovaných proudů a to generace proudu bez přívodu tekutiny. Eliminuje se tedy potřeba potrubí pro přívod tekutiny a zařízení se může umístit přímo tam, kde je ho zapotřebí. Další výhodou takto generovaných syntetizovaných proudů je vysoká intenzita turbulence. Této vlastnosti bývá využíváno zejména pro chlazení nebo ohřev.

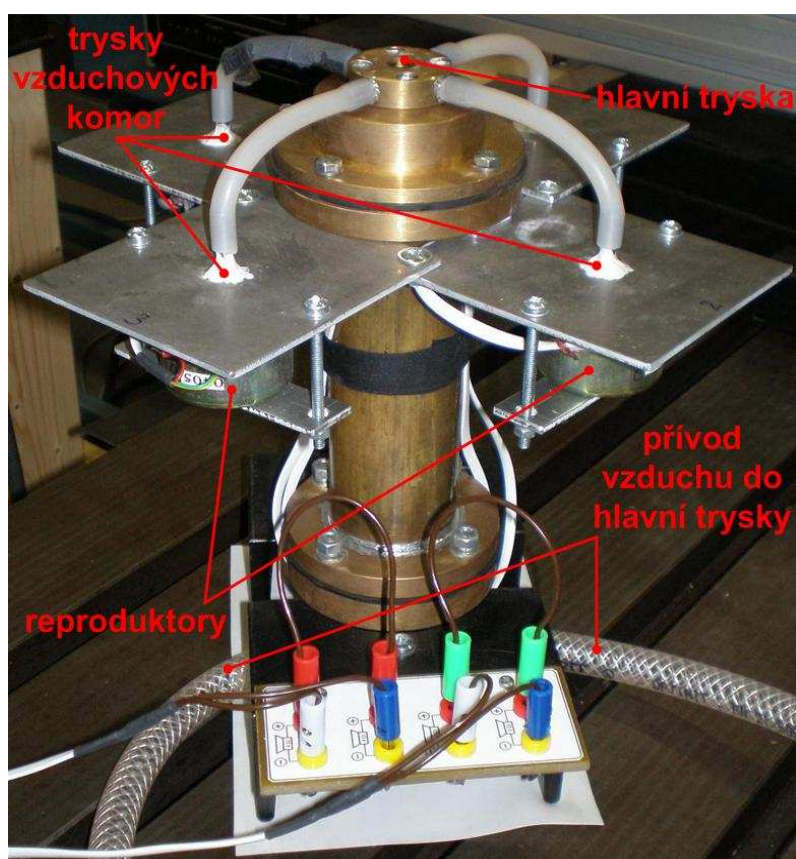
Pro použití syntetizovaných proudů se nabízí mnoho aplikací, které jsou zaměřeny na řízení proudu tekutin. Provádějí se výzkumy hlavně v oblastech aerodynamiky (letecký a automobilový průmysl) a v oblastech týkajících se chlazení, případně ohřevu (energetický průmysl, výpočetní technika). Výzkum postupně rozšiřuje využití syntetizovaných proudů i v jiných odvětvích.

V této práci jsou pulzní proudy využívány k řízení proudění tekutiny, které ovlivňují v ústí trysky.

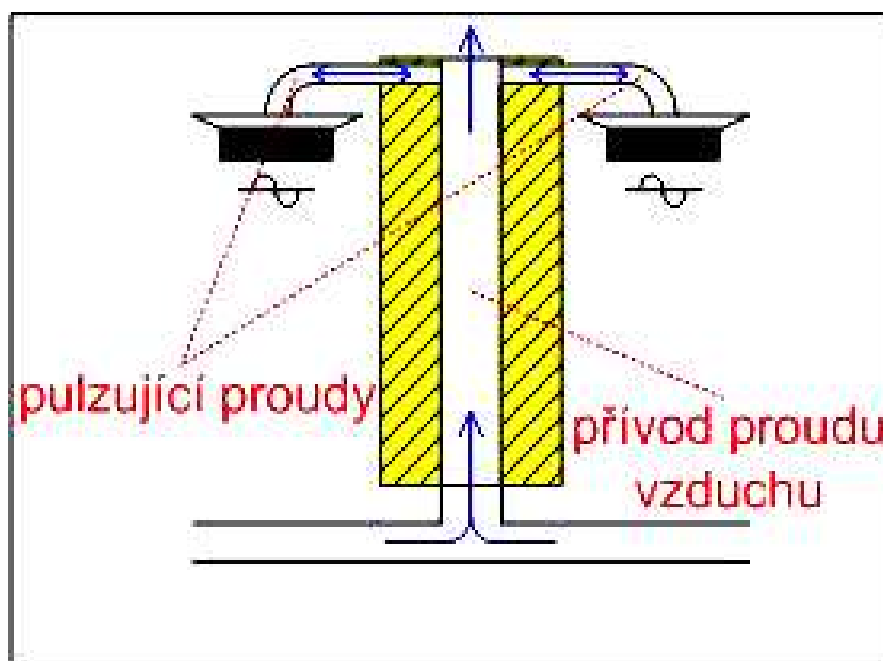
4 Příprava měření

4.1 Popis a zapojení zařízení

Zařízení pro experimentální výzkum řízení toku tekutiny pomocí syntetizovaných proudů je zobrazeno na obr. 4.1-1 a 4.1-2.



Obr. 4.1-1 Zařízení pro řízení toku tekutiny



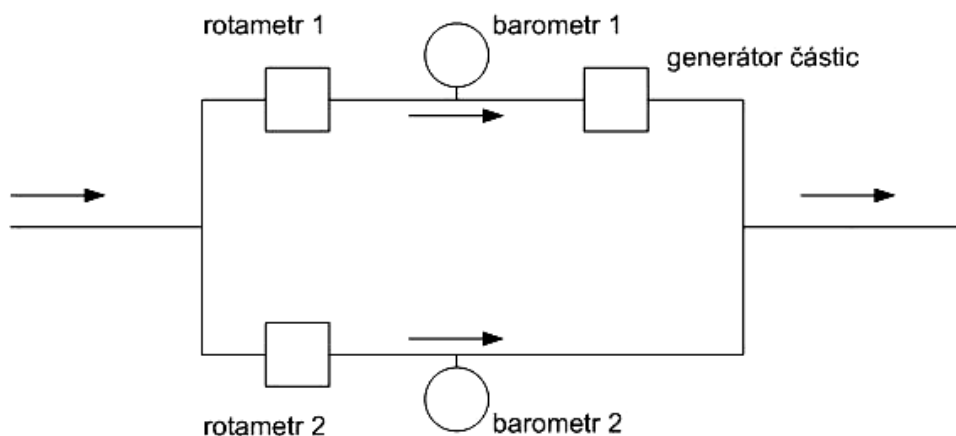
Obr. 4.1-2 Řez zařízením pro řízení toku tekutiny

Hlavní proud tekutiny je přiváděn dvěma hadicemi k měřené soustavě. Tyto hadice jsou ve spodní části měřené soustavy spojeny a kolmo vzhůru je přiváděn hlavní proud tekutiny tryskou. Uspořádání přívodu tímto způsobem zajišťuje rovnoměrný přívod tekutiny. K ústí trysky jsou přivedeny čtyři na sebe kolmé vývody hadiček, kterými je přiváděno proudění vzniklé oscilujícími membránami (uspořádání trysky je názornější z obr. 4.1-2). V tomto případě membránu zastupují reproduktory.

Reproduktory byly připojeny na funkční generátor Agilent 33220A, který generoval sinusové signály. Aby signál funkčního generátoru vyhovoval zadaným parametrům, byl zesílen pomocí výkonového zesilovače a nastaven tak, aby výkon dvou reproduktorů zapojených do série byl vždy 0,02 W. Výkon byl docílen signálem o napětí 0,40 V a proudu 0,05 A při obou frekvencích. Hodnoty proudu a napětí zesíleného signálu byly měřeny multimetrem Agilent U1252A.

Generátor funkcí Agilent 33220A je možné připojit k zařízení, které mu předává informace o spouštění a vypínání svého výstupu. Informační signál je přiveden do funkčního generátoru pomocí vnějšího triggeru. Signál s informací o spuštění funkčního generátoru je v tomto případě posílán z řídicí jednotky laseru. Ta je propojena jak s vlastním laserem, tak i s osobním počítačem. Komunikace řídicí jednotky a počítače je zprostředkována TCP/IP protokolem. Řídicí jednotka laseru také řídí okamžik pořízení záznamu obrazu kamerou.

Na obr. 4.1-3 je znázorněno schéma zapojení několika zařízení, kterými je kontrolován průtok přiváděného vzduchu se sytícími částicemi.



Obr. 4.1-3 Zapojení rotametrů a generátoru částic

Jelikož syčení vzduchu částicemi pomocí samotného generátoru částic lze nastavovat jen velmi hrubě, je přívod vzduchu rozdělen do dvou paralelních větví, aby bylo dosaženo optimálního syčení vzduchu částicemi. Průtok jednou větví určuje průtok generátorem částic, druhá větev slouží k jemnějšímu doladění syčení. Přístroje jsou zobrazeny na obr. 4.1-4 a obr. 4.1-5. Odečtením hodnot z rotametrů a barometrů a následných výpočtů podle [10] a [11] získáme průtok v obou větvích a sečtením těchto hodnot je získán průtok v ústí trysky.



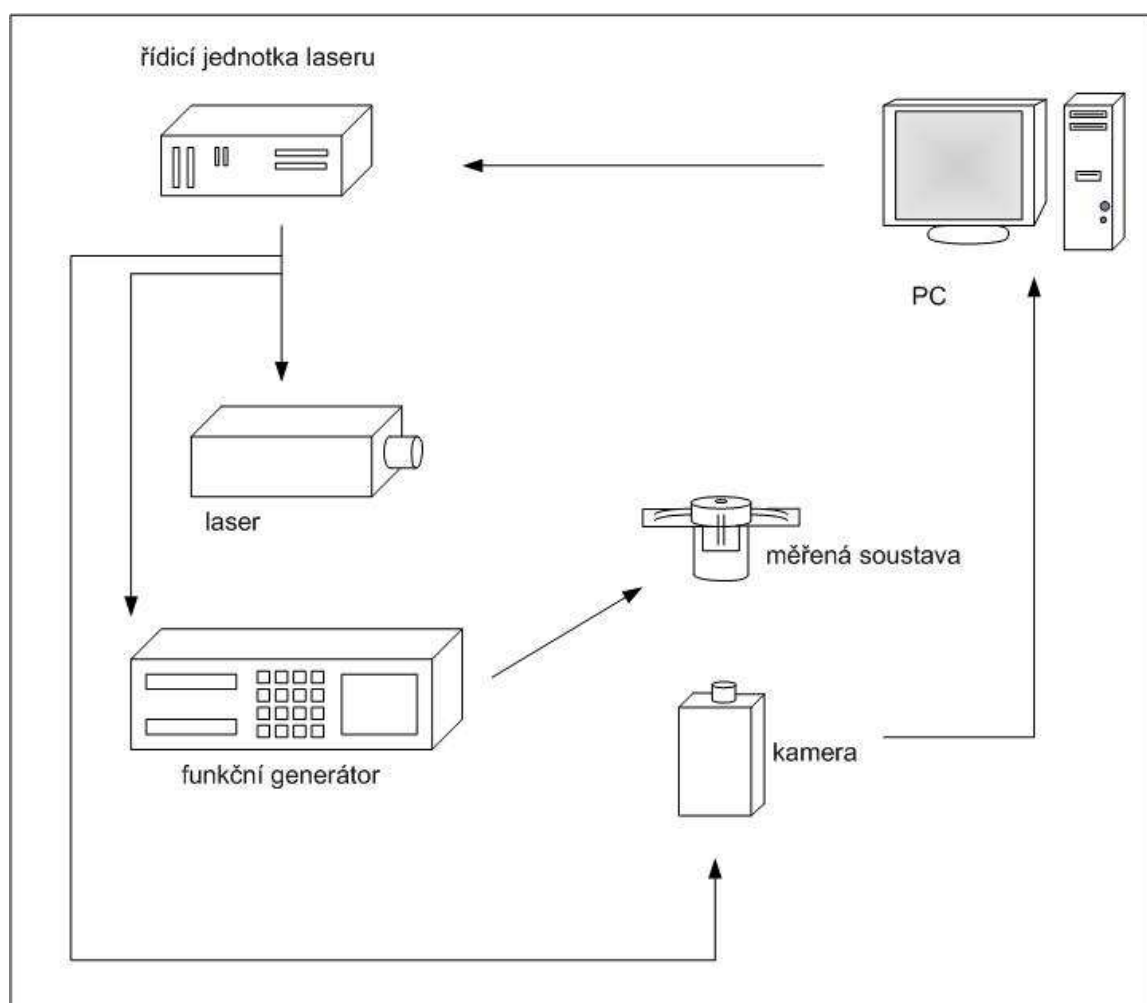
Obr. 4.1-4 Generátor částic



Obr. 4.1-5 Rotametry a barometry

4.2 Synchronizace měřené soustavy s měřícím systémem

Aby bylo možno zkoumat periodické chování proudění a studovat děje během jedné periody, je nutné synchronizovat měřenou soustavu s měřícím systémem. Schéma zapojení jednotlivých zařízení je zobrazeno na obr. 4.2-1.



Obr. 4.2-1 Synchronizace jednotlivých zařízení

Poté, co je nastaven generátor funkcí a výkonový zesilovač, je uživatel schopen po zapojení všech zařízení podle obr. 4.2-1 pouze pomocí počítače synchronizovat měření. Synchronizace v tomto případě slouží k zaznamenání průběhu proudění během celé

periody. Uživatelem nastavené parametry jsou zaslány do řídicí jednotky laseru, jež následně vyšle signál do funkčního generátoru a ten začne budit reproduktory. S definovaným zpožděním poté řídicí jednotka spustí laser a kameru a je pořízen obrazový záznam, který je odeslán do počítače, uložen a připraven ke zpracování.

4.3 Nastavení parametrů zařízení

Nastavení parametrů zařízení, jejichž hodnoty zůstávaly během měření neměnné, jsou popsány v tab. 4.3-1.

Tab. 4.3-1 Parametry zařízení

Softwarové nastavení parametrů programem FlowManager	kamera	device	HiSense 12bit
		mode	asynchronní režim
			metoda jednotlivých expozic
	laser	device	NewWave Gemini
		mode	triggerred
	acquisition control	timing	130 (resp. 60) μ s mezi pulzy
			50 záznamů
		burst start	fixed time interval
		programmable trigger output	zpoždění signálu pulzu laseru a kamery
vnější zařízení	funkční generátor Agilent 33220A	amplituda 100 mV	
	výkonový zesilovač	zesílení na 400 mV a 50 mA	

5 Zpracování dat a popis měření

5.1 Zpracování záznamů

Záznamy pořízené měřicím zařízením jsou ukládány jako bitmapa. Je to černobílý obraz rozdělený na jednotlivé pixely. V tomto případě je počet pixelů 1280×1024 . Pro každý pixel je určena hodnota jasu v rozmezí 0 (černý pixel) až 4095 (bílý pixel). Příklad získaného záznamu je zobrazen na obr. 5.1-1.



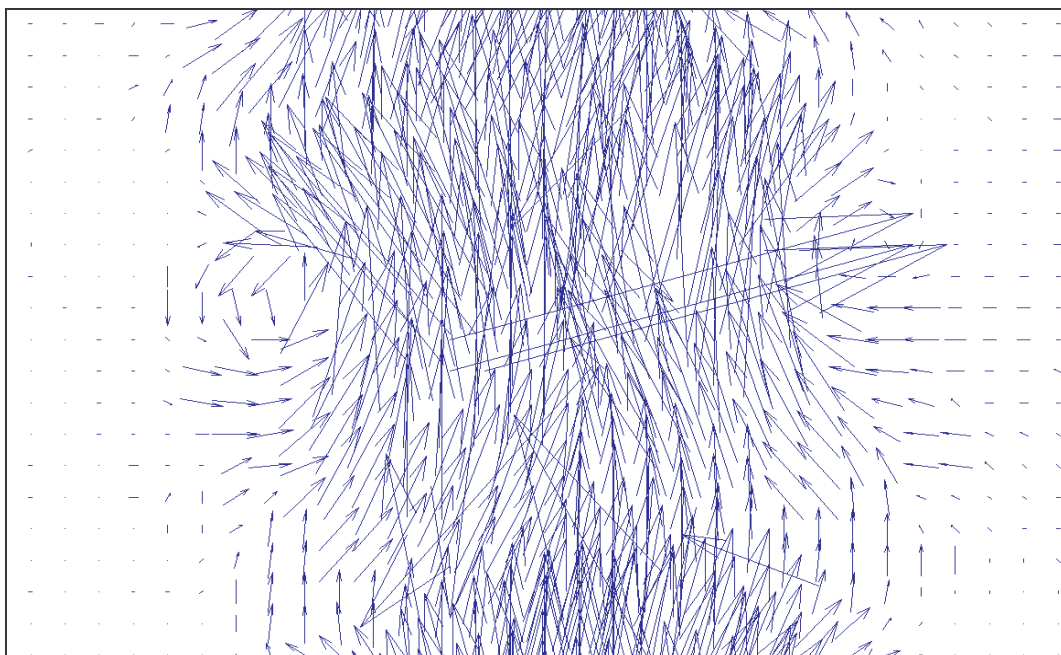
Obr. 5.1-1 Příklad záznamu obrazu v podobě bitmapy

Bílé tečky v záznamu jsou pozice sytících částic unášených proudem vzduchu. Pro měření byla použita metoda jednotlivých expozic, tedy s krátkým časovým odstupem byly pořízeny dva záznamy. Časový odstup je definován uživatelem a je závislý na rychlosti proudění, jak je poznamenáno v kap. 2.3, zabývající se limity metody PIV. Pro přesné měření postačuje zaznamenat padesát obrazů v jeden a ten samý okamžik dané periody. Pokud je nastaveno zpoždění pořízení záznamu za buzením reproduktorů měřeného systému, je možné prozkoumat po krátkých časových úsecích průběh proudění celou periodou zkoumaného děje.

5.1.1 Vzájemná korelace a validační metody

Po získání obrazových záznamů přichází na řadu aplikace metody vzájemné korelace. Pro tuto metodu je zapotřebí určit vhodné parametry, to znamená zvolit velikost vyhodnocované oblasti a také stupeň překrytí vyhodnocovaných oblastí v procentech. Jelikož při rychlejším turbulentním proudění byl maximální posun částic 8 pixelů (určeno experimentálně z pořízených záznamů) a dle podmínky dodržení maximálního posunutí částic pod jednu čtvrtinu velikosti strany vyhodnocované oblasti (kap. 2.3.2), byla stanovena velikost strany vyhodnocované oblasti na hodnotu 32 pixelů. Stupeň překrytí vyhodnocovaných oblastí byl nastaven na hodnotu 50% jak v horizontálním, tak i ve vertikálním směru, opět byl určen experimentálně.

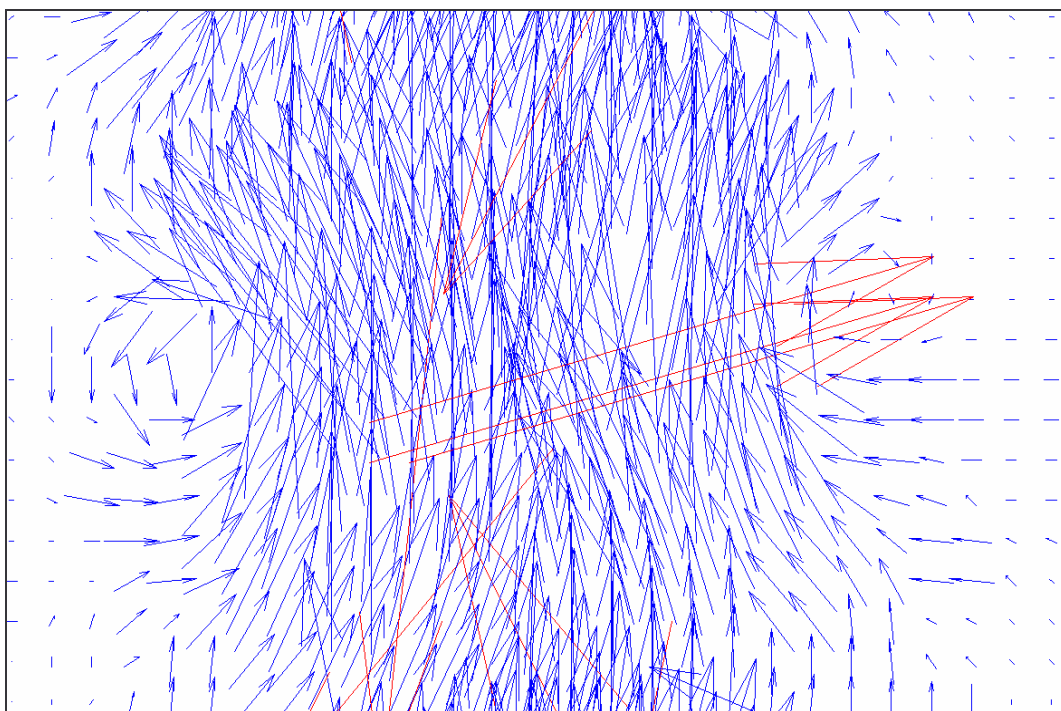
Aplikací metody vzájemné korelace na obrazový záznam je získána vektorová mapa. Příklad vektorové mapy je zobrazen na obr. 5.1-2. Vektorová mapa je většinou zatížena chybnými vektory, jež bývají na první pohled patrné. Tyto chybné vektory vznikají nesprávnými výpočty, jejichž příčinou mohou být např. ztracené páry (kap. 2.3.1).



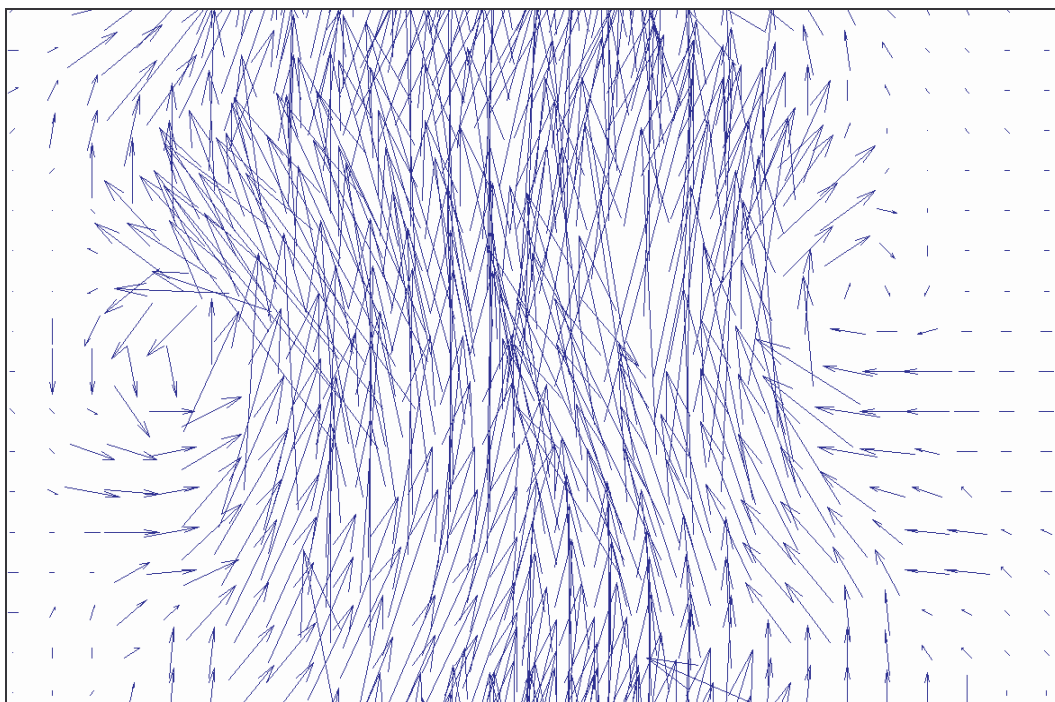
Obr. 5.1-2 Příklad vektorové mapy po aplikaci metody vzájemné korelace

Pro zpracování záznamů existuje metoda, která z velké části chybné vektory odstraní. Tato metoda se nazývá validace rozsahu (Range Validation) a omezení vektorů rychlosti v proudovém poli je možno zadáním maximální a minimální velikosti vektoru nebo hodnotami složek vektoru. Obr. 5.1-3 a 5.1-4 znázorňují postup při aplikaci této metody.

Pokud jsou správně určeny chybné vektory, nejsou již akceptovány pro další výpočty a uživatel má možnost tyto vektory odstranit i vizuálně.



Obr. 5.1-3 Vektorová mapa po aplikaci metody validace rozsahu (chybné vektory jsou označeny červenou barvou)



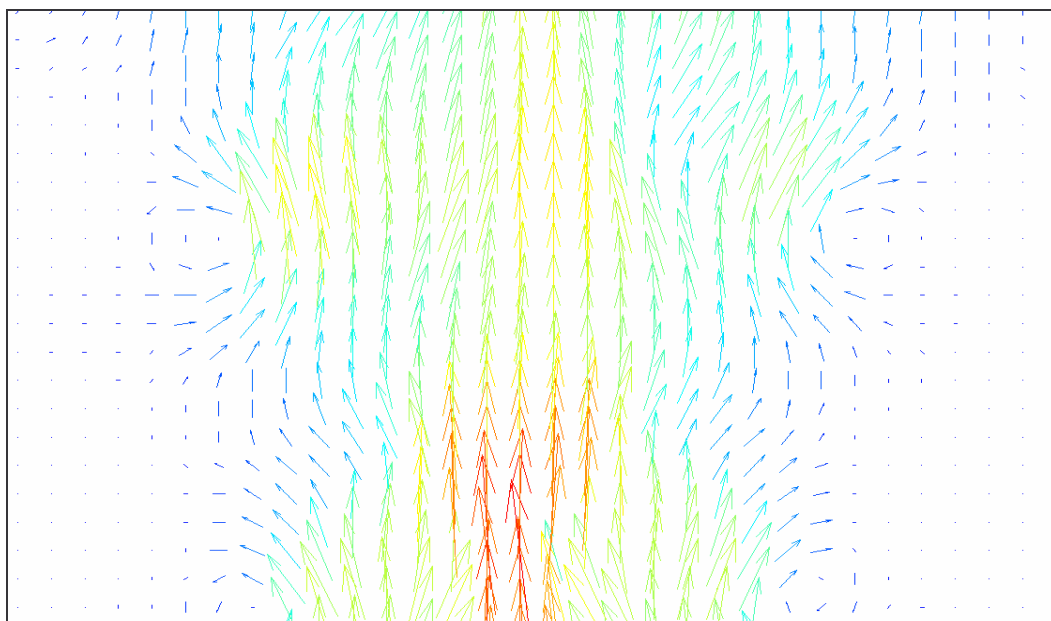
Obr. 5.1-4 Vektorová mapa po aplikaci metody validace rozsahu bez zobrazení chybných vektorů

Pokud má proudění vířivou povahu, nelze validaci rozsahu na konkrétní složku rychlosti použít, protože by mohlo dojít k odstranění platných vektorů. Zde je vhodnější použít metodu nazvanou Moving-Average Validation. Tato metoda určí platnost vektoru rychlosti na základě předpokladu spojitosti proudění ze sousedních vektorů a podle hodnoty akceptačního faktoru. Pokud je vektor rychlosti označen jako chybný, nahradí se odhadnutým vektorem.

Jelikož nastavení experimentu přineslo výborné výsledky po aplikaci metody validace rozsahu, nebylo zapotřebí použít metodu Moving-Average Validation.

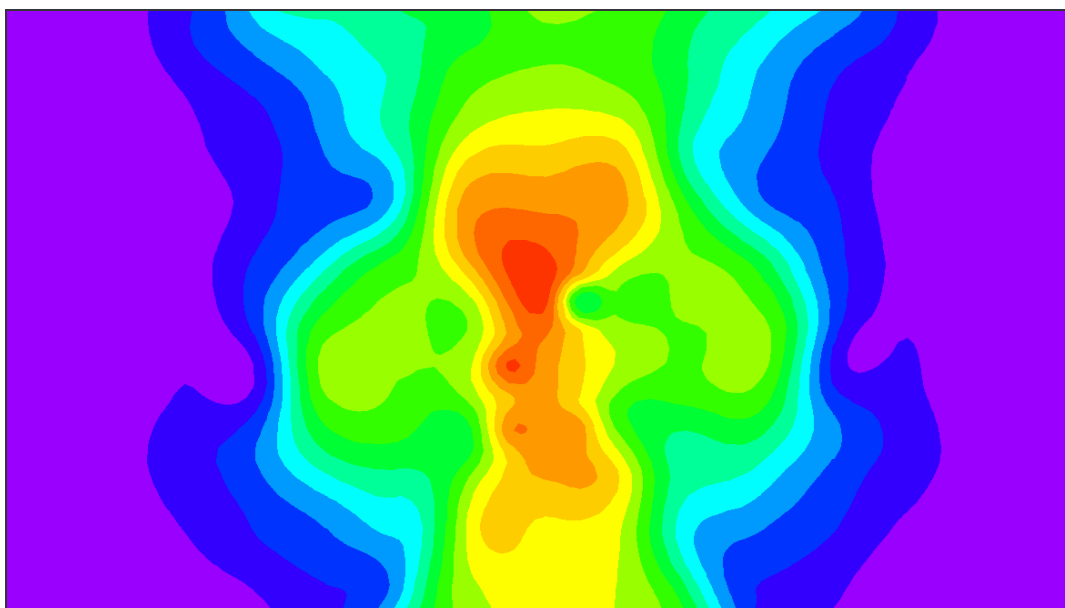
5.1.2 Vizualizace PIV záznamů

Jak je zmíněno výše, je v každém měřeném okamžiku periody pořízeno 50 záznamů téhož děje ve stejném okamžiku periody. Pokud se aplikuje na každý získaný záznam vzájemná korelace a následně i validace rozsahu, je možno provést “zprůměrování” vektorových map. Výsledkem je vektorová mapa nazývaná vektorová statistika (obr. 5.1-5). Ta eliminuje další náhodné odchylky vektorů v jednotlivých záznamech a vystihuje tak hlavní trend zkoumaného proudění. Pro názornější zobrazení rychlosti proudění je možné vektory barevně rozlišit v závislosti na jejich velikosti. Na obr. 5.1-5 jsou vektory velkých rychlostí červené a se snižující se velikostí vektorů přechází jejich barva přes žlutou a zelenou na modrou.

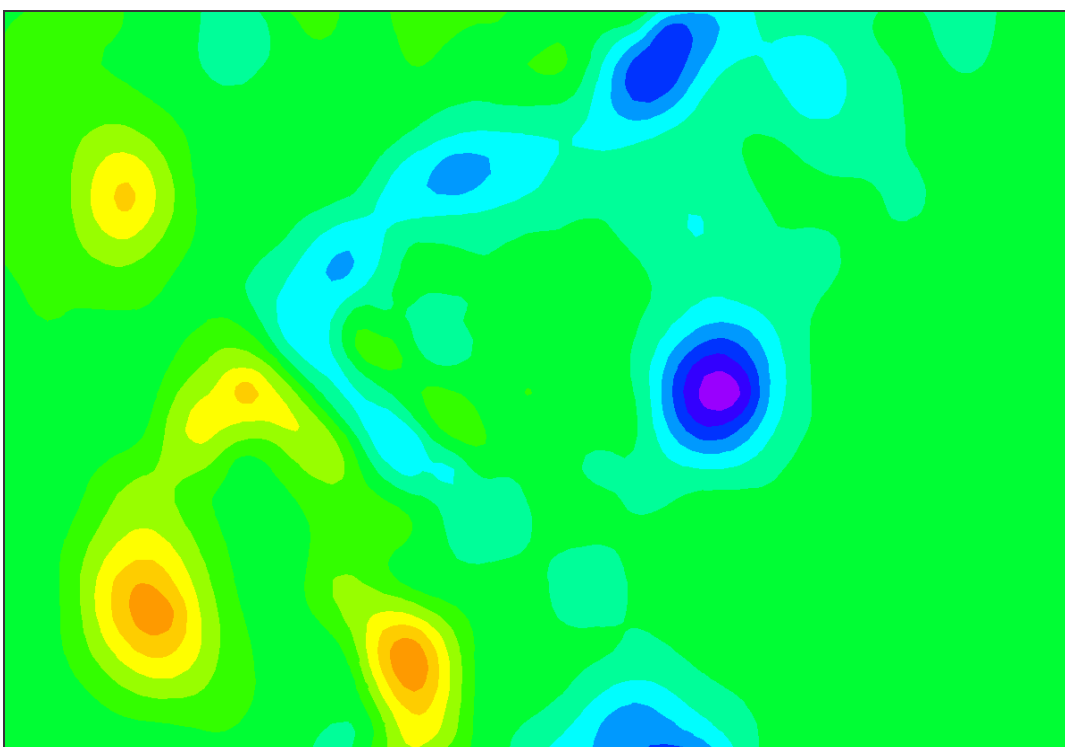


Obr. 5.1-5 Vektorová statistika

Další výhodou je možnost zobrazení vektorové mapy pomocí různých vizualizací. Na obr. 5.1-6 je z vektorové statistiky spočítána skalární mapa rychlosti. Opět červená barva určuje oblast největší rychlosti proudu a fialová naopak oblasti s nejmenší rychlostí proudu.



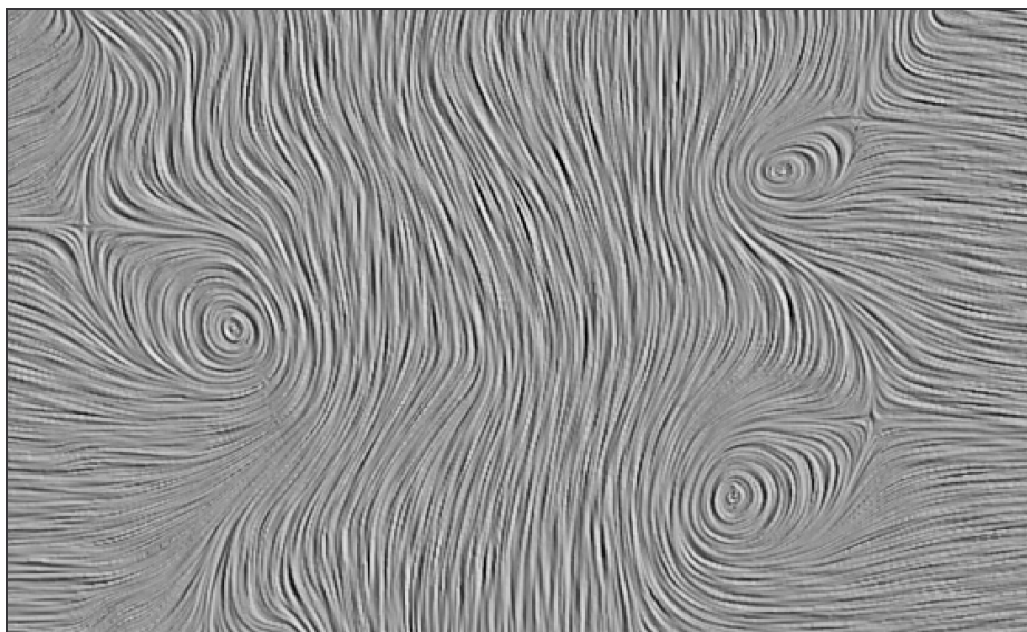
Obr. 5.1-6 Skalární mapa rychlosti



Obr. 5.1-7 Skalární mapa vířivosti

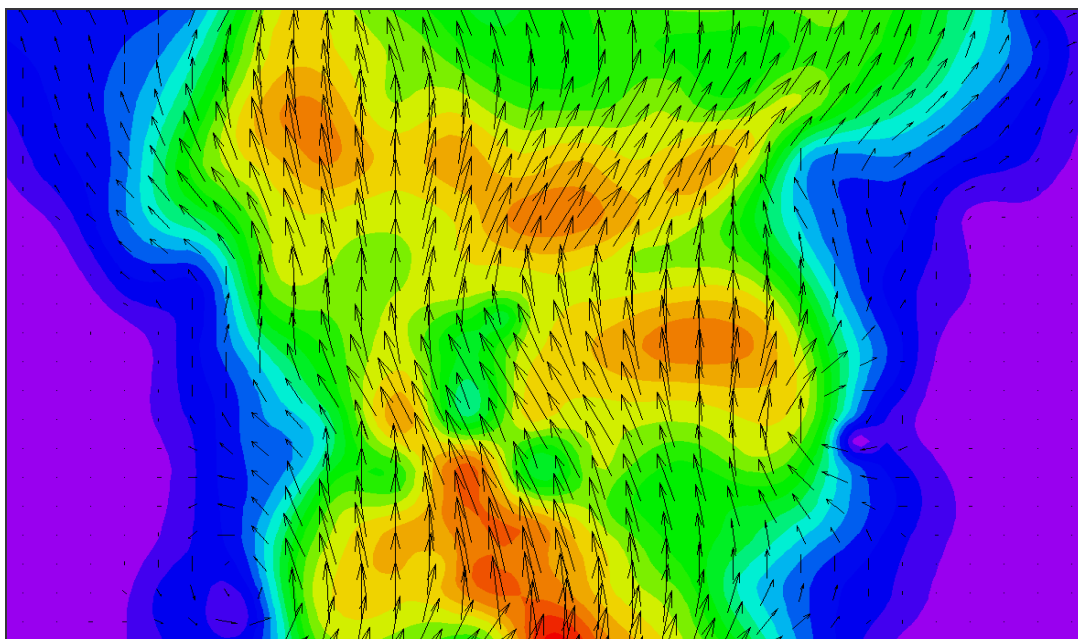
Jednou z dalších vizualizací je možnost zobrazení výsledků měření v podobě skalární mapy vířivosti (obr. 5.1-7). Odstíny červené zobrazují vířivost proudění v protisměru hodinových ručiček a odstíny modré zobrazují vířivost proudění ve směru hodinových ručiček. Zelená barva značí oblasti s nulovou vířivostí, je nastavena pouze jako pozadí.

Jedna z možných vizualizací, jež poskytuje srozumitelný obraz zkoumaného děje, je i zobrazení výsledků v podobě texturové mapy po aplikaci funkce Line Integral Convolution. Příklad takové mapy ilustruje obr. 5.1-8. Z obrázku jsou patrné víry a hlavní tendence proudění tekutiny.



Obr. 5.1-8 Texturová mapa

Vhodně zvolené vizualizace lze také kombinovat. Nabízí se překrytí jednotlivých obrazů a tím lze v některých případech lépe chápat tvar i smysl proudění, jak ukazuje obr. 5.3-5. Zde byla pro demonstraci použita skalární mapa rychlostí jako pozadí a na ní je zobrazena vektorová statistika.



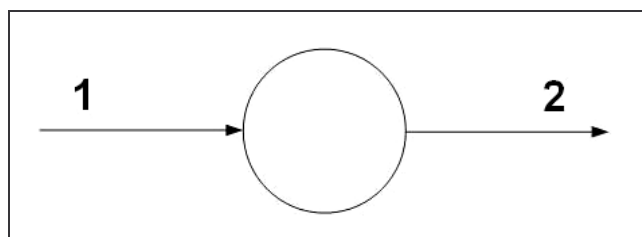
Obr. 5.1-9 Kombinace mapy rychlostí a vektorové statistiky

5.2 Popis měření

Výzkum řízení toku tekutiny v této práci zahrnuje měření a popis proudění pro několik režimů zapojení budících reproduktorů a také pro dvě hodnoty průtoků. Měření bylo prováděno při frekvencích budícího signálu reproduktorů 82 Hz a 190 Hz. Při frekvenci 82 Hz bylo řízeno laminární proudění (Reynoldsovo číslo $R_e=1600$) a při frekvenci 190 Hz bylo řízeno turbulentní proudění (Reynoldsovo číslo $R_e=5000$). Budící signál reproduktorů byl nastaven tak, aby výkon dvou reproduktorů zapojených do série byl vždy 0,02 W. Výkon byl docílen signálem o napětí 0,40 V a proudu 0,05 A při obou typech proudění.

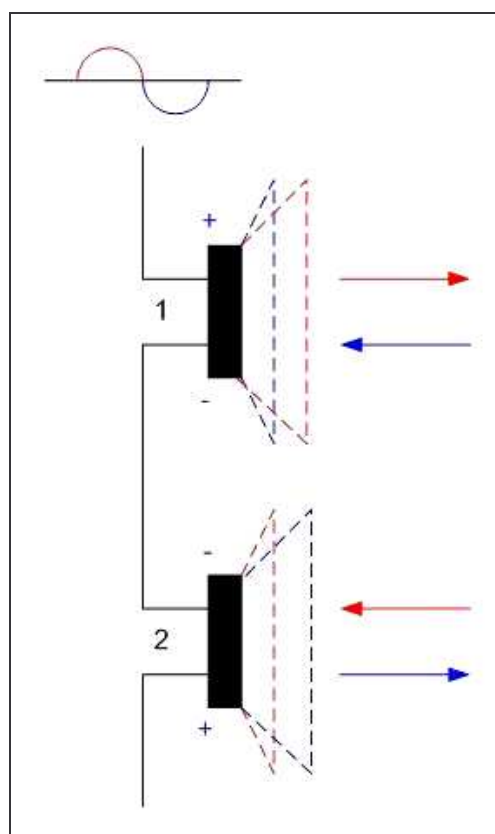
5.2.1 Mód A

Tento mód buzení je nazýván bifurkační v jedné rovině a je znázorněn na obr. 5.2-1. Šipky určují směr proudění vzduchu tryskami pulzací.



Obr. 5.2-1 Směr proudění tryskami v módu A

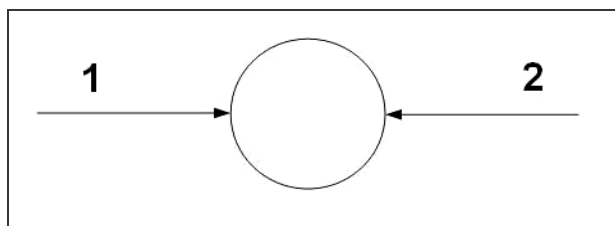
Obr. 5.2-2 ukazuje buzení reproduktorů v bifurkačním režimu.



Obr. 5.2-2 Buzení reproduktorů módu A

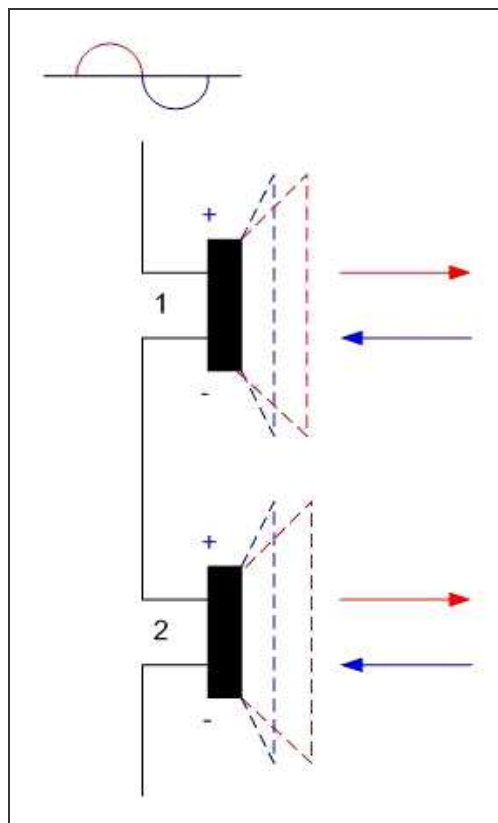
5.2.2 Múd B

Buzení v tomto módu se nazývá osově symetrické v jedné rovině a obr. 5.2-3 charakterizuje ovlivnění hlavního proudění vzduchu dvěma vývody.



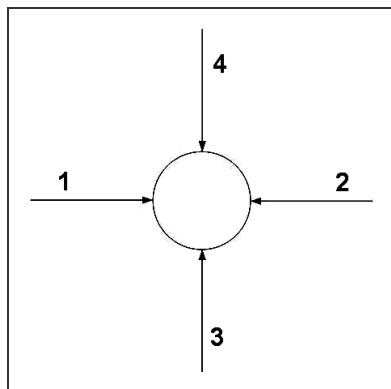
Obr. 5.2-3 Směr proudění tryškami v módu B

Znázornění buzení reproduktoru je demonstrováno na obr. 5.2-4.



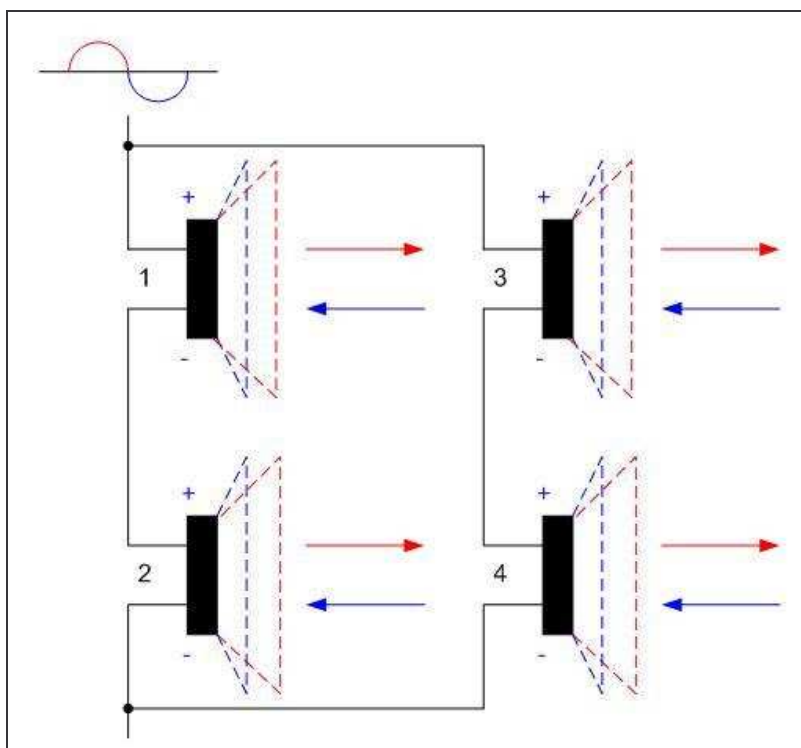
Obr. 5.2-4 Buzení reproduktorů módu B

5.2.3 Mód C



Obr. 5.2-5 Směr proudění tryskami v módu C

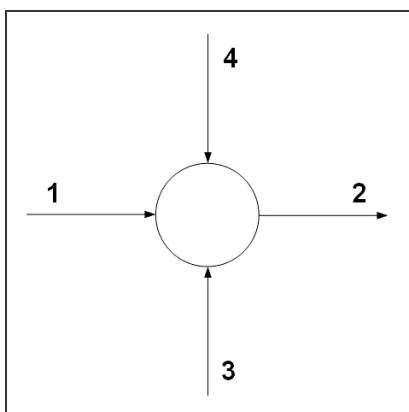
Buzení v módu C je osově symetrické (obr. 5.2-5) a všechny čtyři reproduktory jsou buzeny stejným sinusovým signálem (obr. 5.2-6).



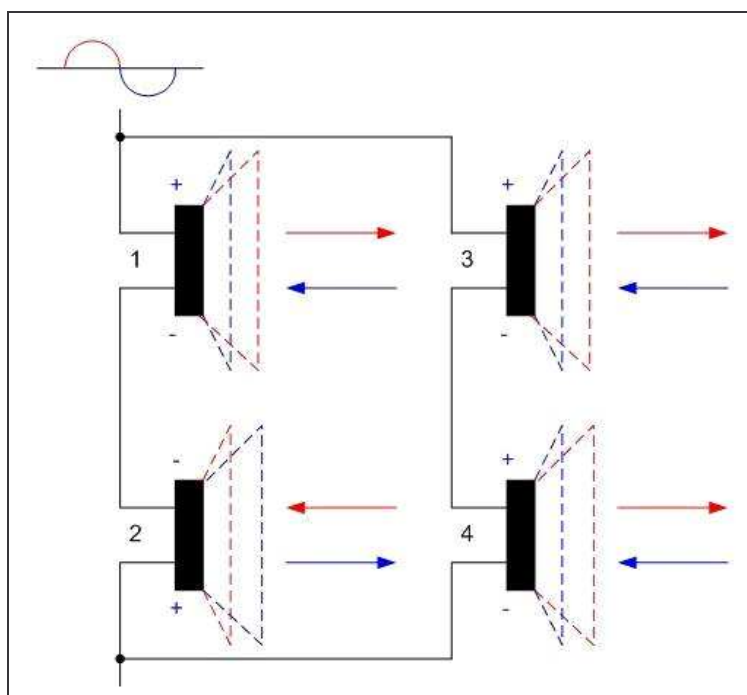
Obr. 5.2-6 Buzení reproduktorů módu C

5.2.4 Mód D

Tento mód je získán spojením módu A s módem B. Směry proudění vzduchu jednotlivými tryskami pulzací jsou znázorněny na obr. 5.2-7 a na obr. 5.2-8 je zobrazeno buzení reproduktorů.



Obr 5.2-7 Směr proudění tryskami v módu D



Obr. 5.2-8 Buzení reproduktorů módu D

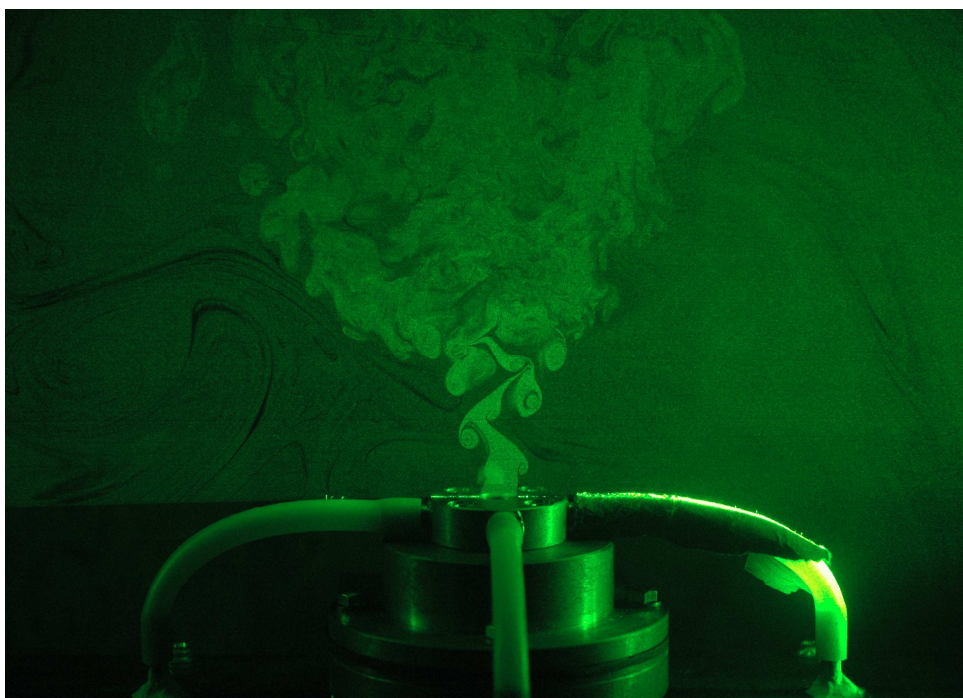
6 Výsledky měření

Syntetizované proudění je charakterizováno nulovým hmotnostním tokem tekutiny v ústí trysky. V této práci byl řízen tok tekutiny v ústí hlavní trysky pulzním prouděním. I když výsledný proud nemá nulový hmotnostní tok v ústí hlavní trysky, má výsledné proudění charakter syntetizovaného proudu.

Střední hodnota rychlosti proudění v případě laminárního proudění byla $2,9 \text{ ms}^{-1}$ a v případě turbulentního proudění 9 ms^{-1} .

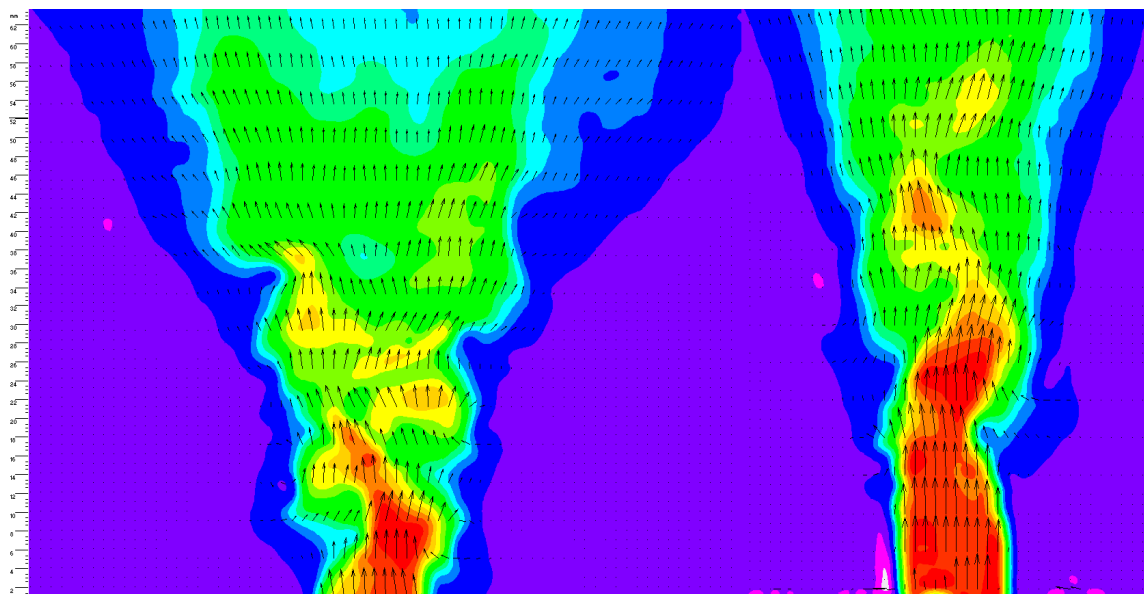
6.1 Mód A - bifurkační

Proudění tekutiny s reproduktory buzenými v tomto módu je znázorněno na obr. 6.1-1.



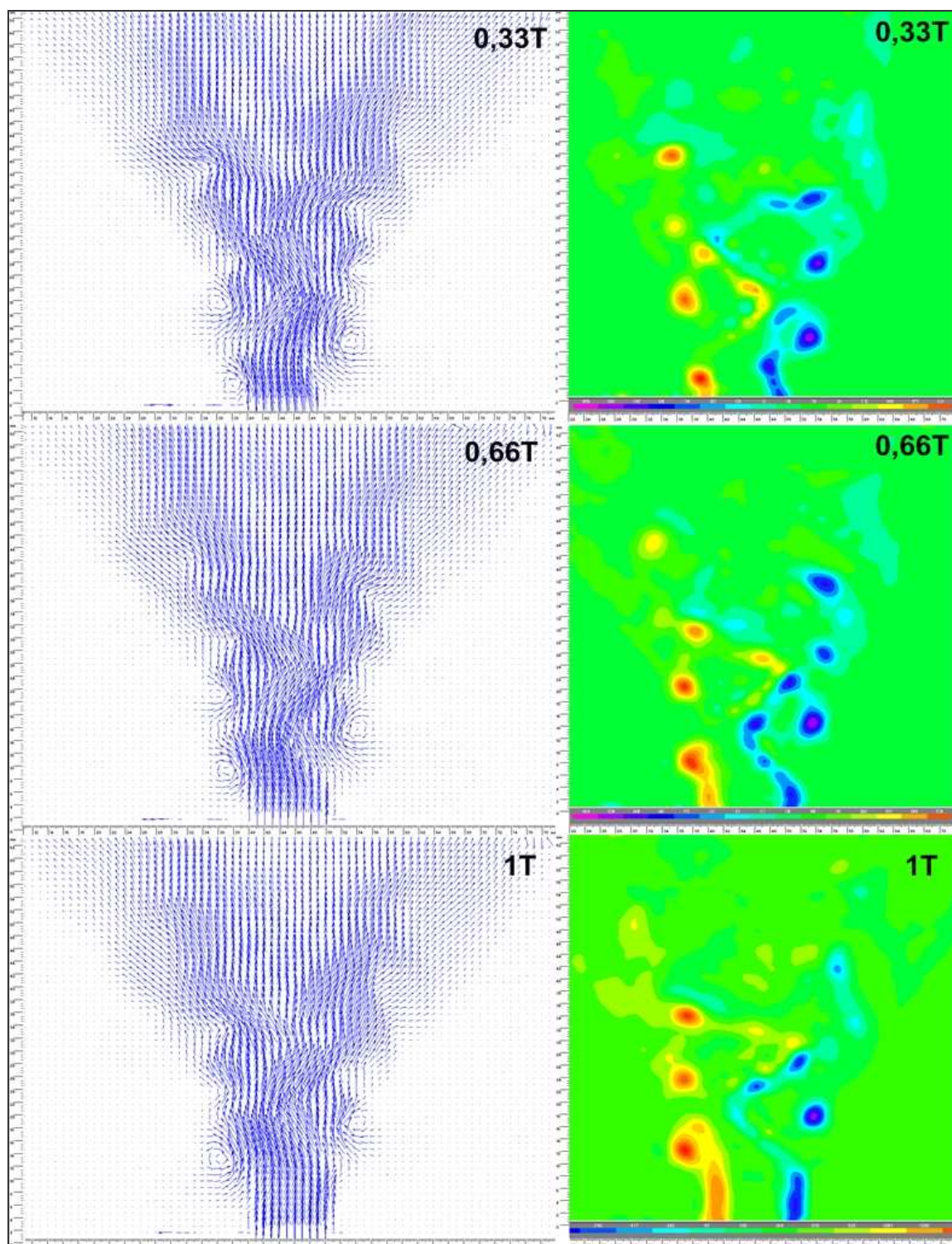
Obr. 6.1-1 Fotografie proudění při zapojení reproduktorů podle módu A

Buzením reproduktorů v tomto módu dochází k rozdělení proudění na dva samostatné proudy (Bifurcating jet) a oba se šíří dál jako jediný pulzační proud. Tento jev je patrný z obr. 6.1-2, na kterém je zobrazena vektorová mapa v podobě rychlostního profilu s pozadím rychlostní mapy.

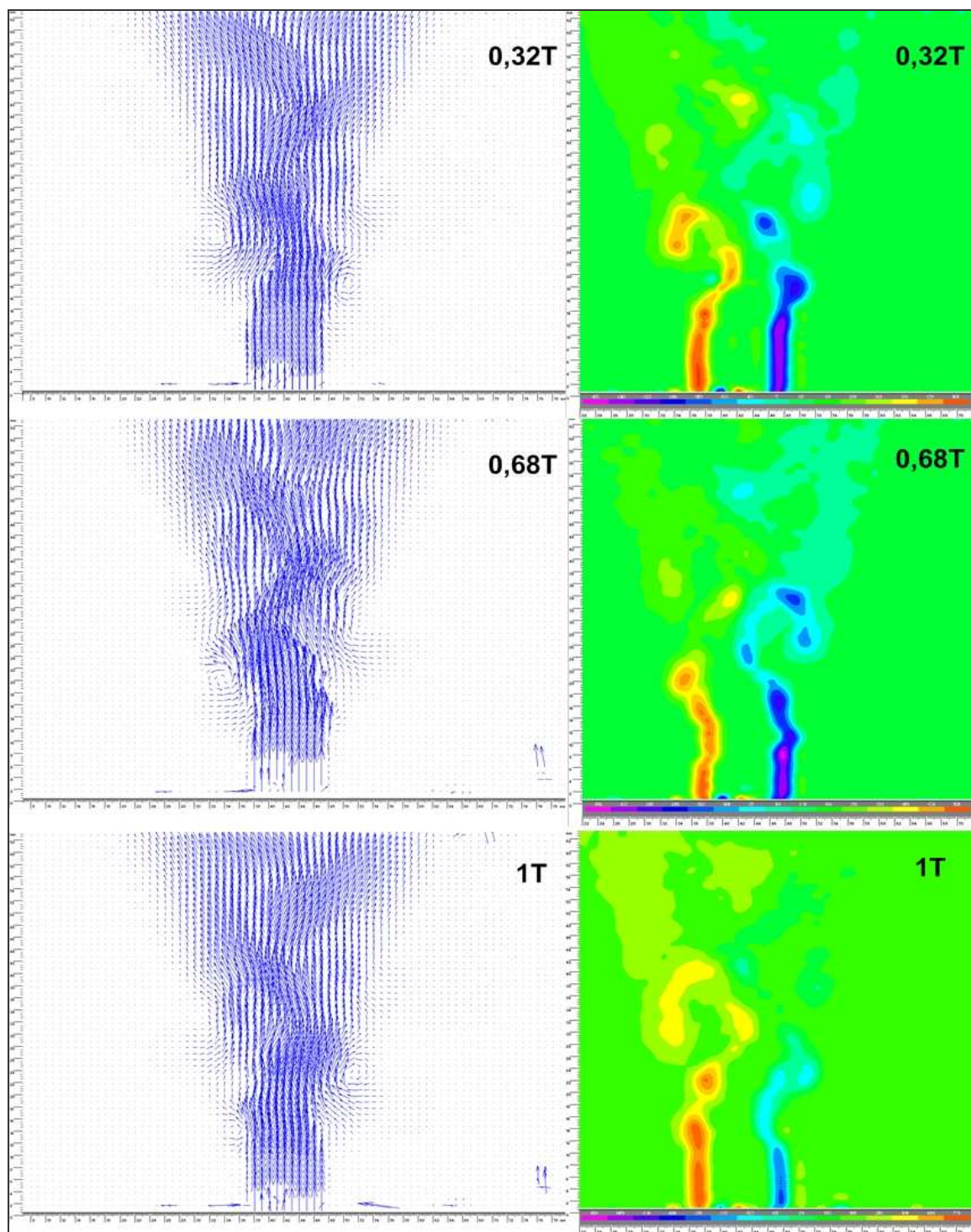


Obr. 6.1-2 Porovnání laminárního (vlevo) a turbulentního proudění (vpravo) módu A

Vývoj proudění během jedné periody budicího signálu je zobrazen obr. 6.1-3 a 6.1-4. Je na něm možno vidět, že první prstencová struktura jakoby vznikala z víru druhé struktury, přičemž každá následující prstencová struktura vychází střídavě z pravého (resp. levého) víru struktury předcházející.

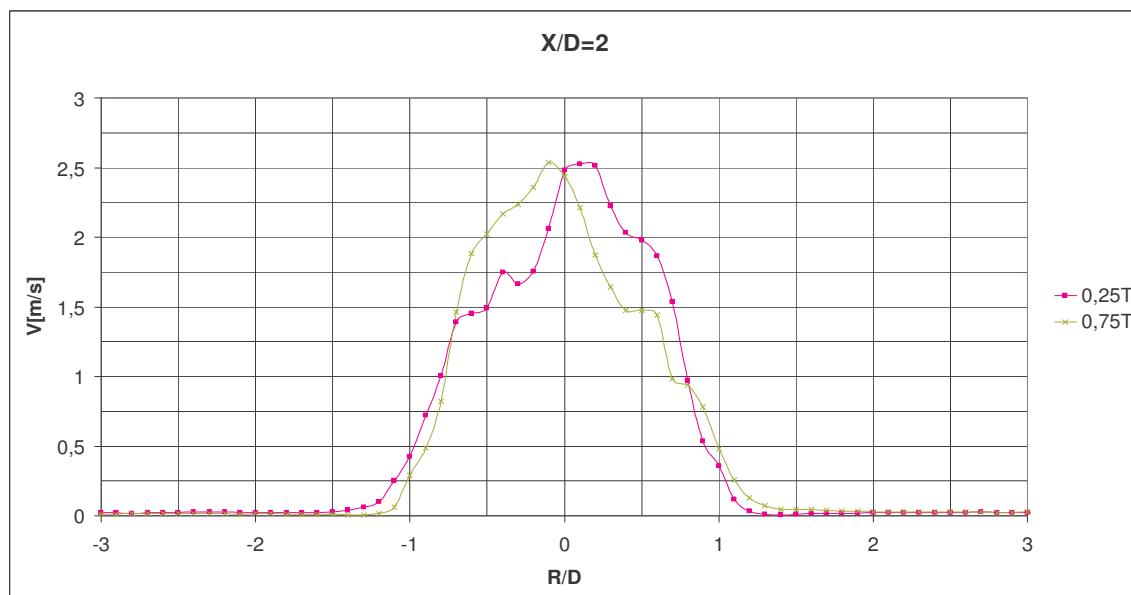


Obr. 6.1-3 Vývoj laminárního proudění módu A (vlevo vektorová mapa, vpravo skalární mapa vířivosti)

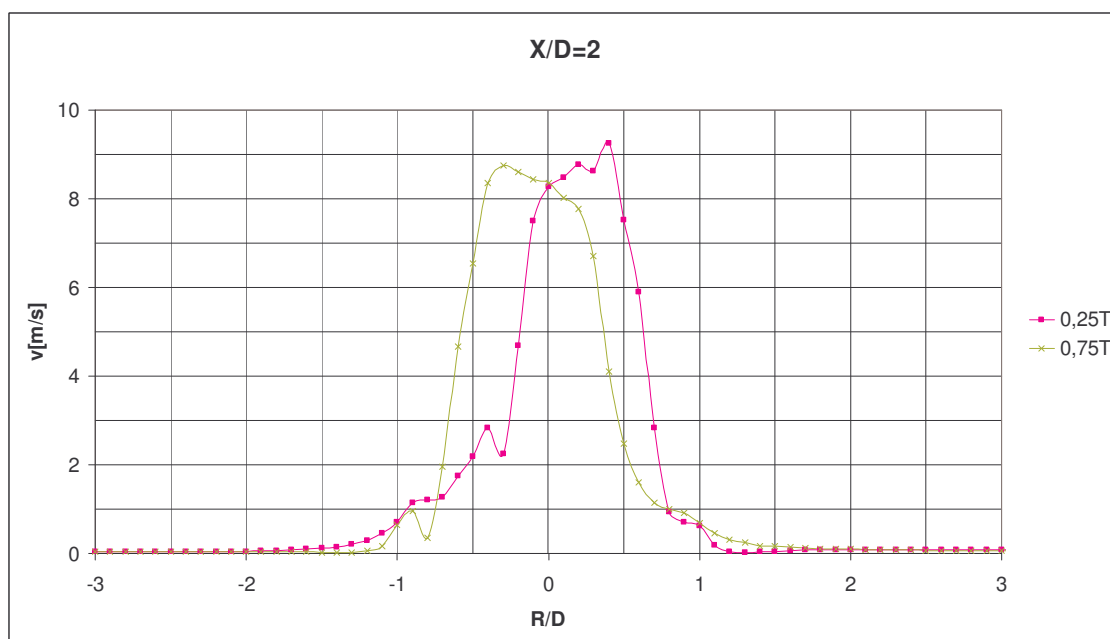


Obr. 6.1-4 Vývoj turbulentního proudění módu A (vlevo vektorová mapa, vpravo skalární mapa vířivosti)

Průběh rozdělení proudění na dva proudy je pozorovatelné z grafu 6.1-1 a 6.1-2

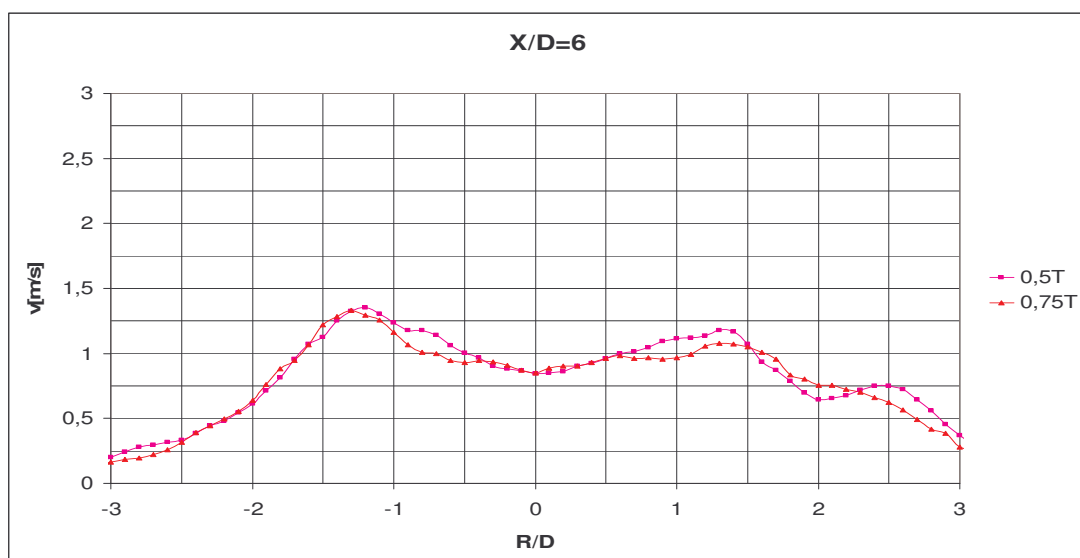


Graf 6.1-1 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky
módu A

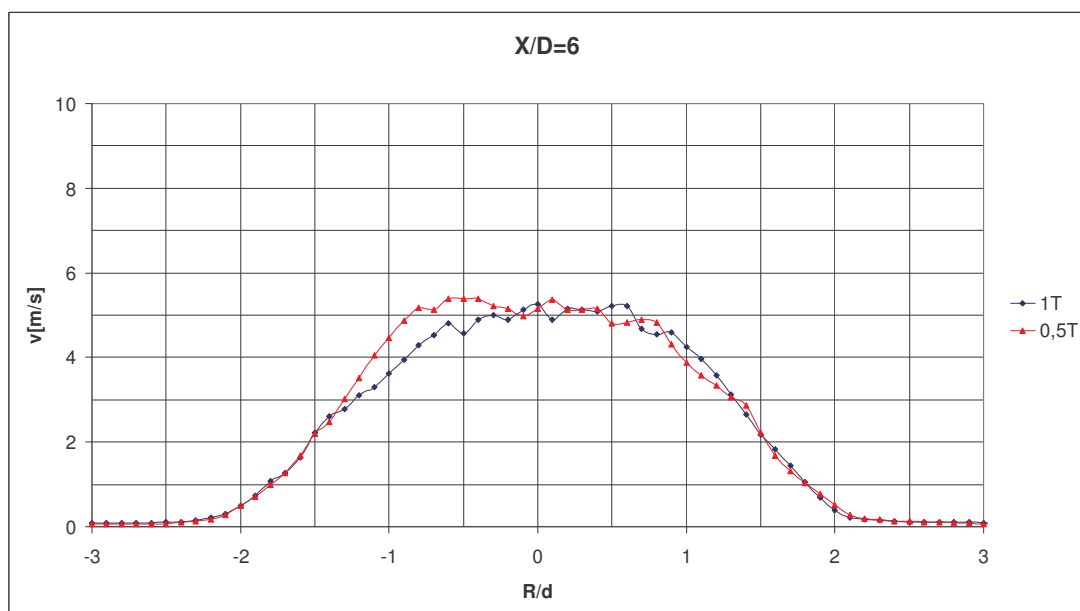


Graf 6.1-2 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky
módu A

Grafy 6.1-3 a 6.1-4 ukazují, že rychlosti proudění se s rostoucí výškou nad ústím trysky během periody postupně zmenšují.



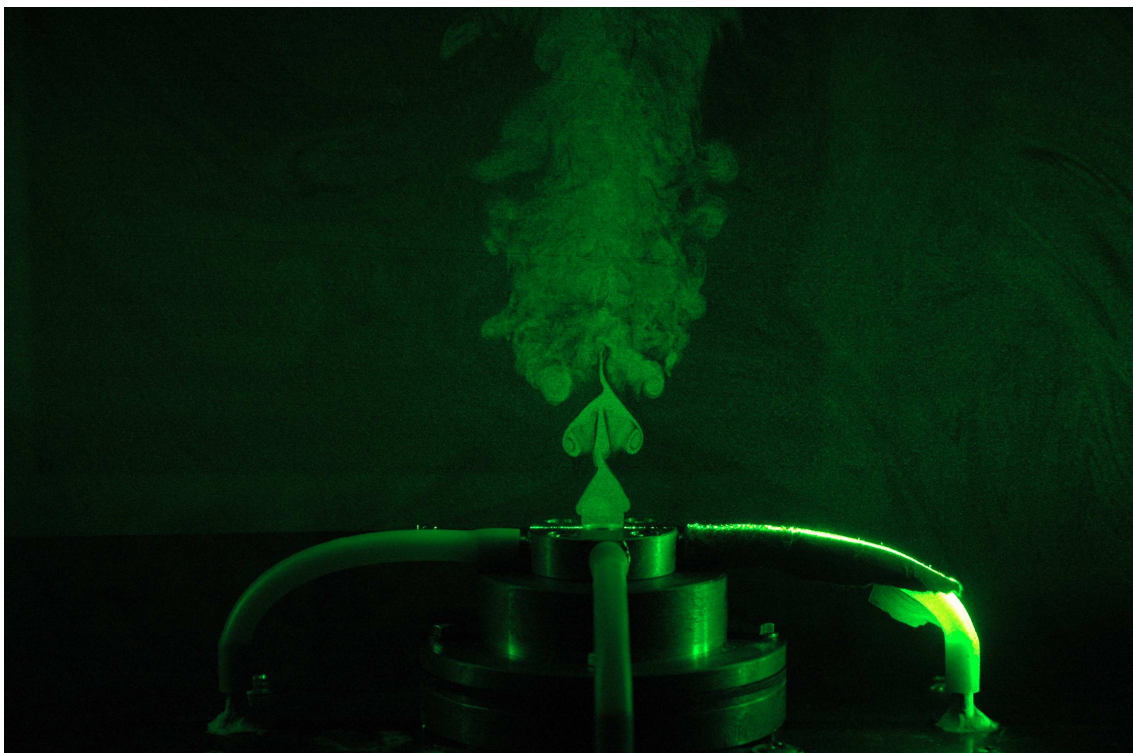
Graf 6.1-3 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu A



Graf 6.1-4 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu A

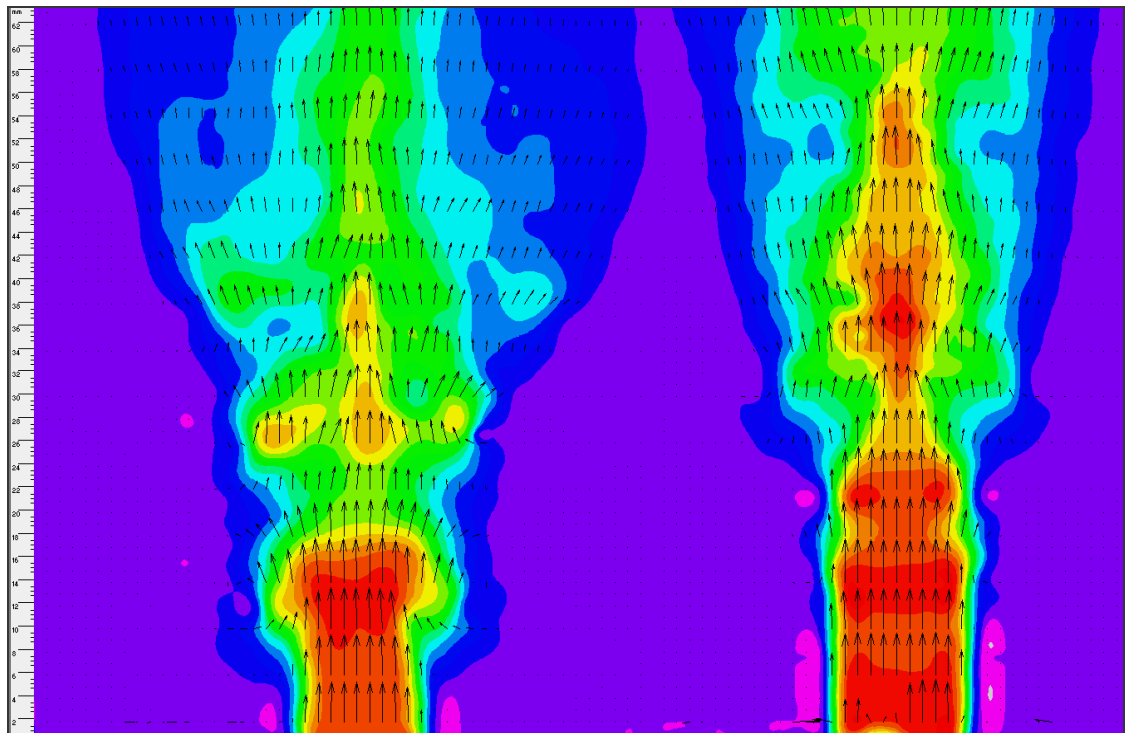
6.2 Mód B – osově symetrický v jedné rovině

Proudění s reproduktory buzenými v módu B je znázorněno na obr. 6.2-1.



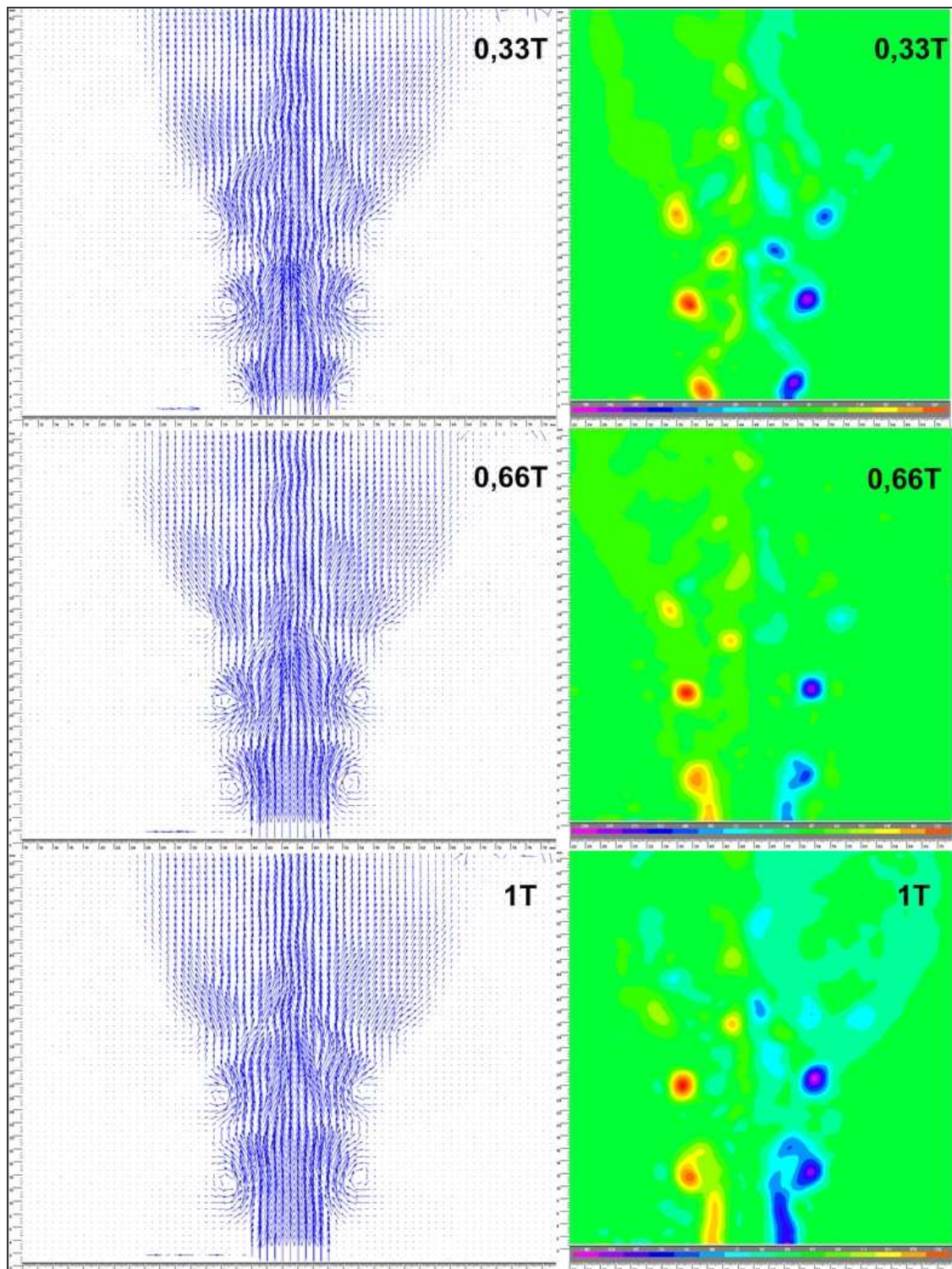
Obr. 6.2-1 Fotografie proudění při zapojení reproduktorů podle módu B

Při bočním pohledu kolmém na rovinu s buzenými reproduktory je vidět, jak se pravidelně po stranách proudění vytváří víry symetrické podle osy trysky. Mezi víry dochází k nárůstu velikosti rychlosti proudění (obr. 6.2-2).

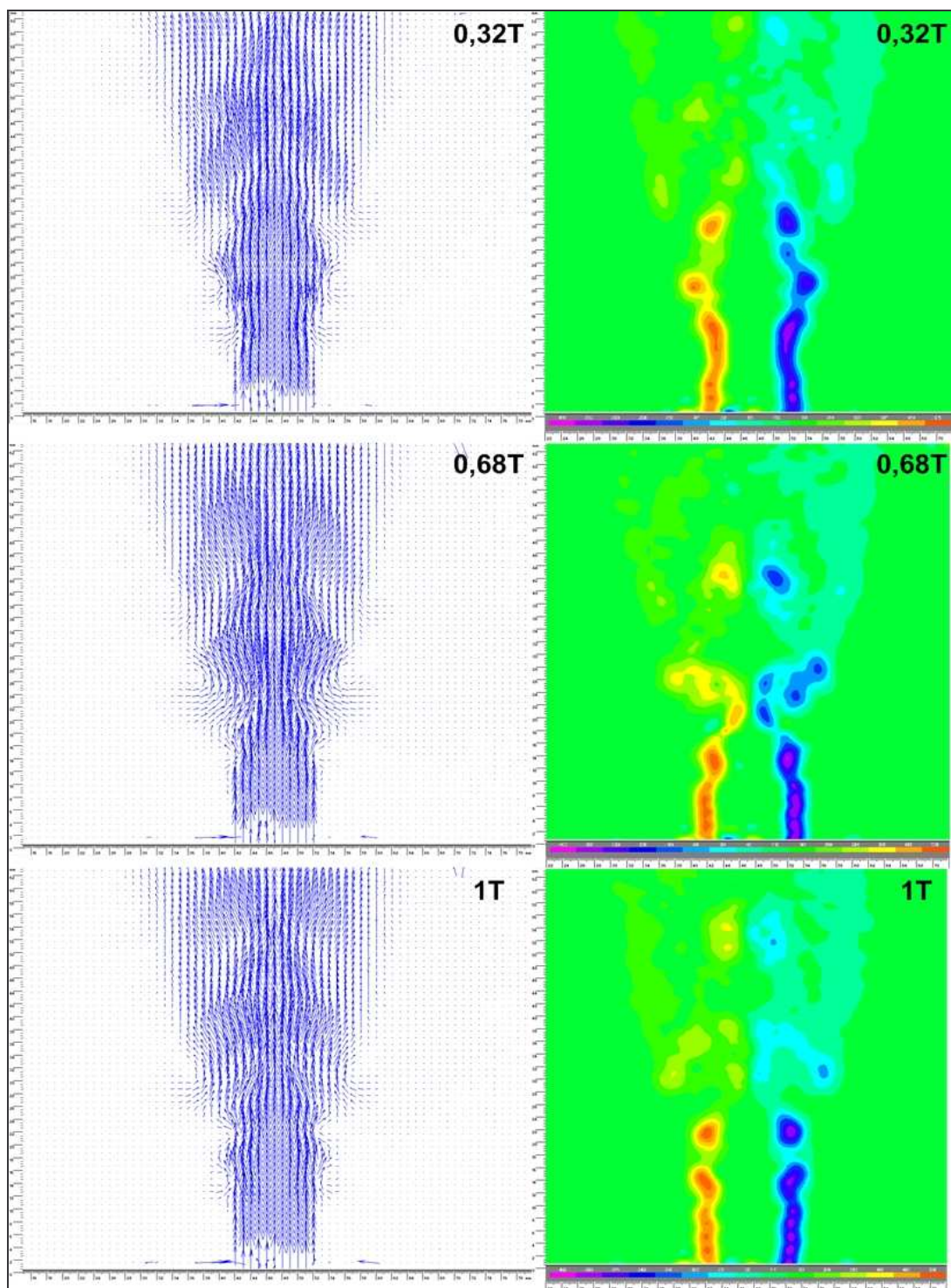


Obr. 6.2-2 Porovnání laminárního (vlevo) a turbulentního proudění (vpravo) módu B

Strukturu a vývoj proudění během periody ukazují obr. 6.2-3 a obr. 6.2-4 v podobě vektorových map a skalárních map vířivosti.

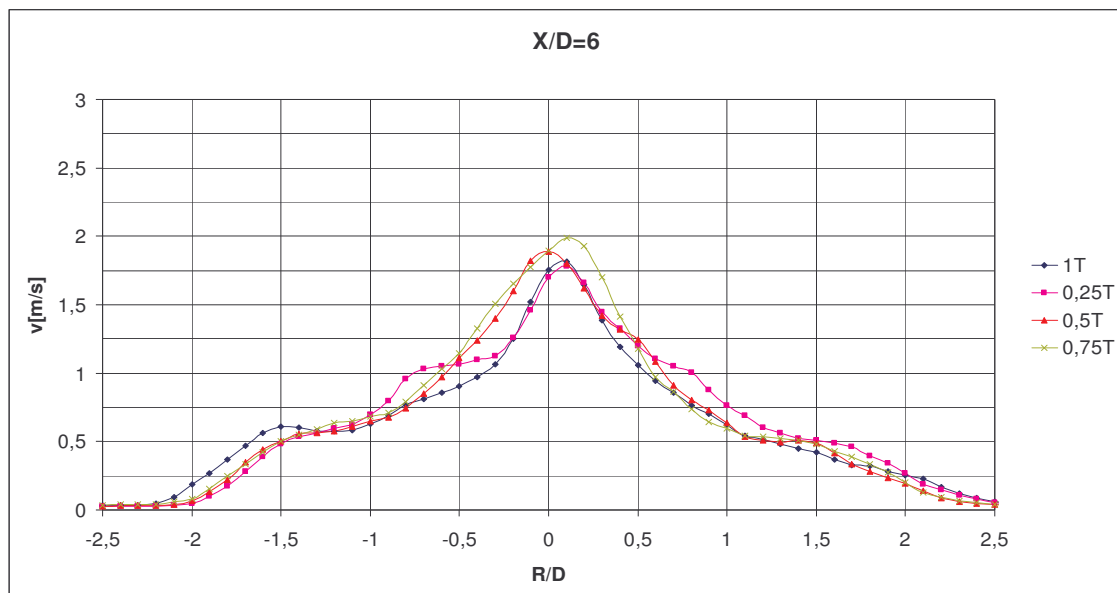


Obr. 6.2-3 Vývoj laminárního proudění módu B (vlevo vektorová mapa, vpravo skalární mapa vířivosti)

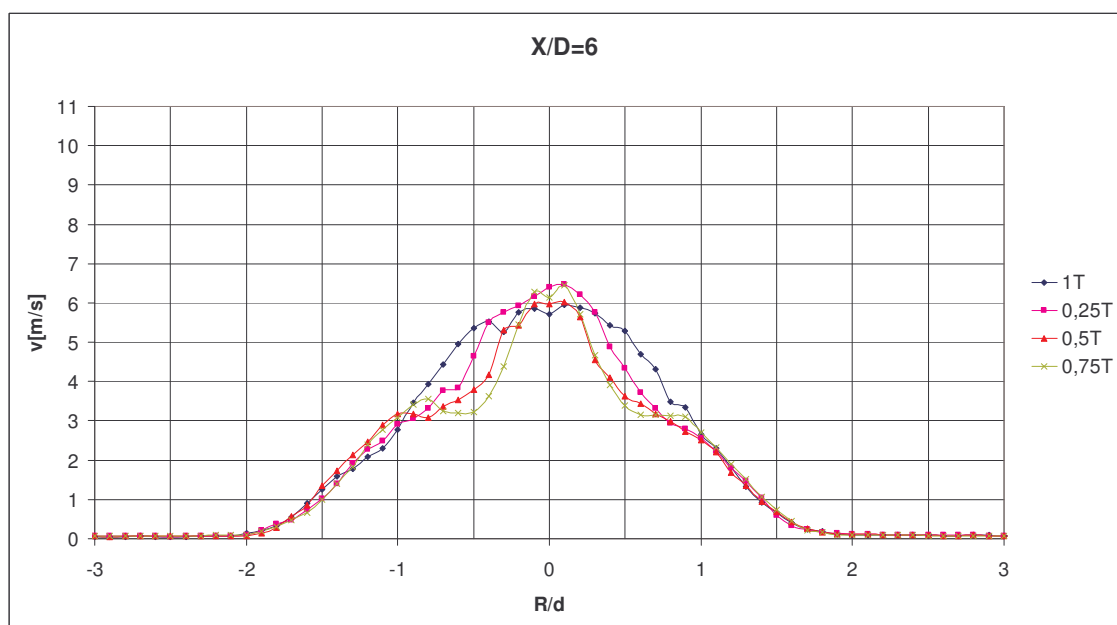


Obr. 6.2-4 Vývoj turbulentního proudění módu B (vlevo vektorová mapa, vpravo skalární mapa vířivosti)

Zrychlení proudu v ose trysky pro oba typy proudění dokazují grafy 6.2-1 a 6.2-2.



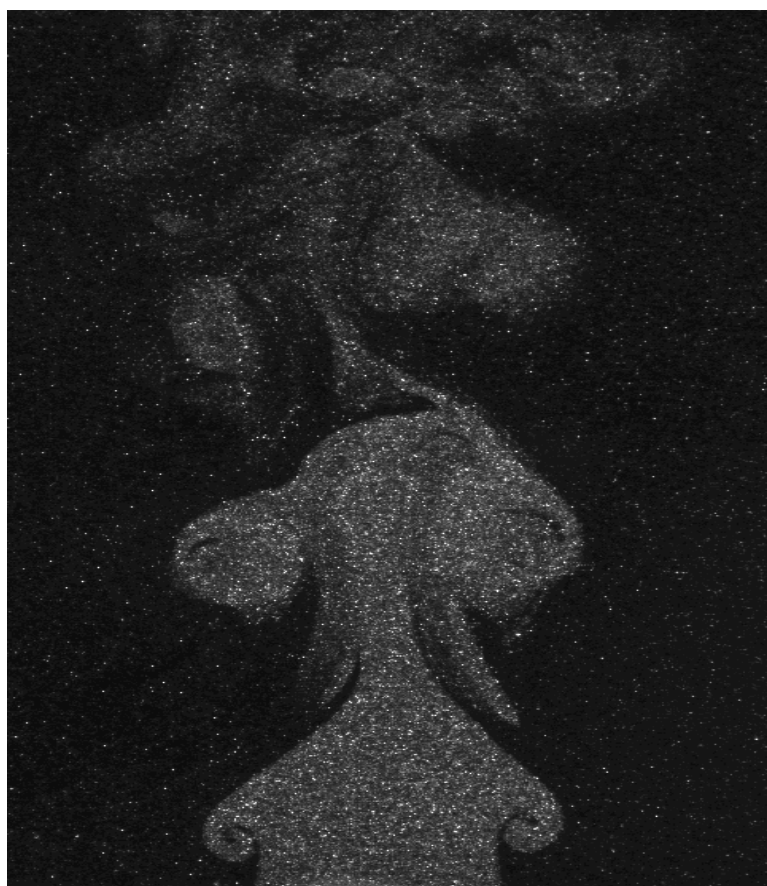
Graf 6.2-1 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky
módu B



Graf 6.2-2 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky
módu B

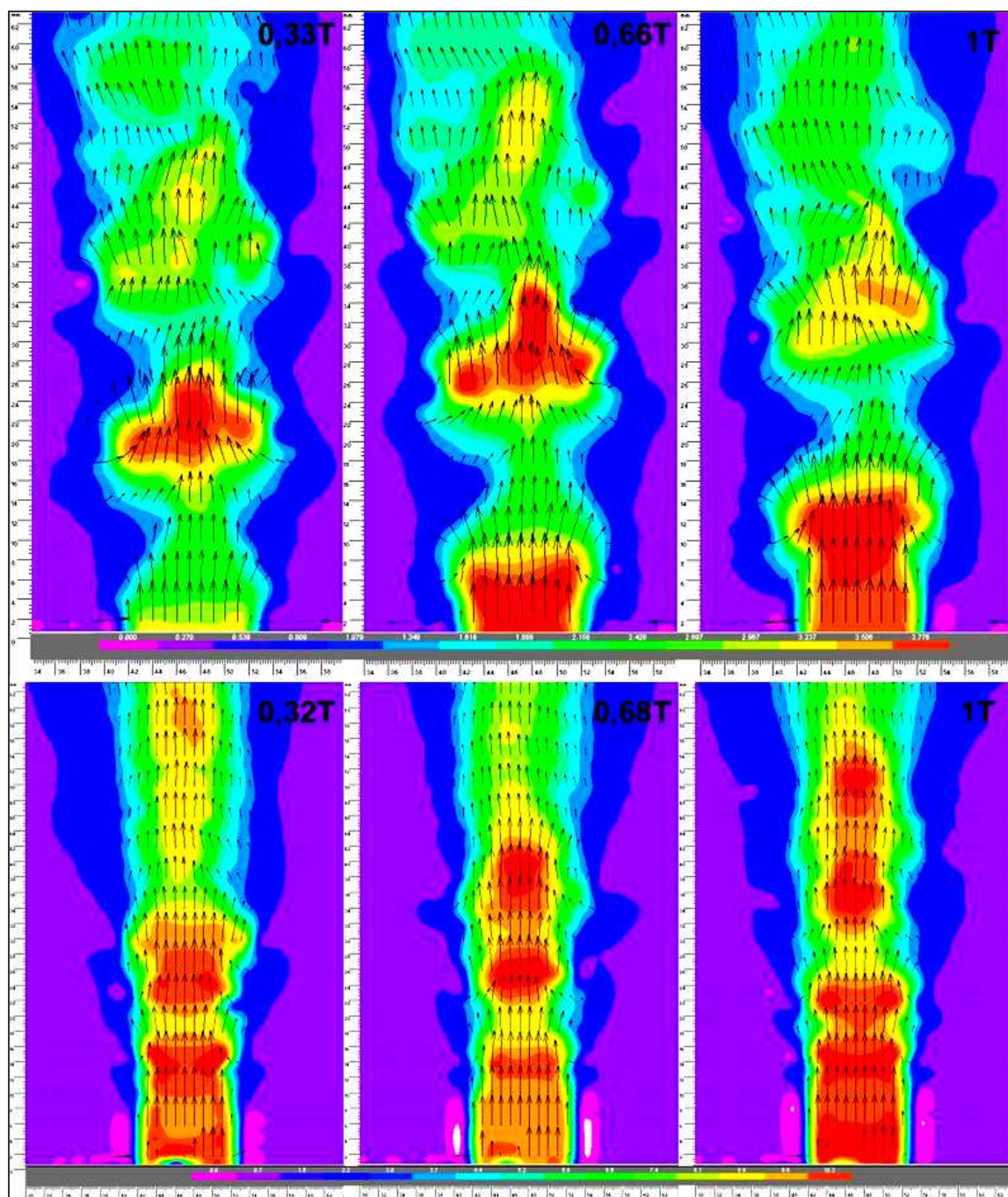
6.3 Mód C – osově symetrický

Na obr. 6.3-1 je zobrazeno proudění ovlivněné buzením reproduktorů podle módu C. Aby nedocházelo k vychylování proudění od osy trysky, je nutné pečlivě nastavit parametry buzených reproduktorů.

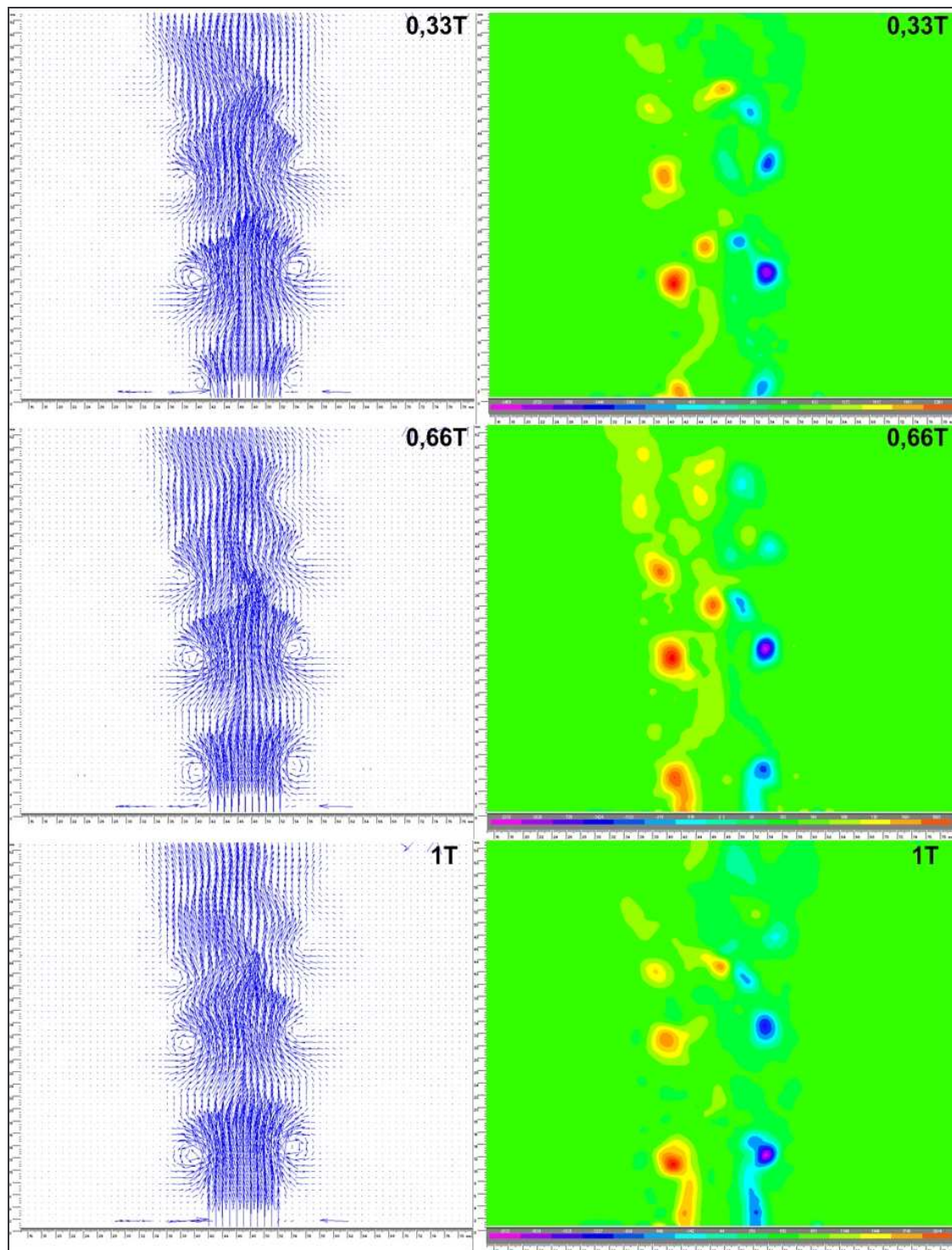


Obr. 6.3-1 Záznam proudění módu C v podobě bitmapy

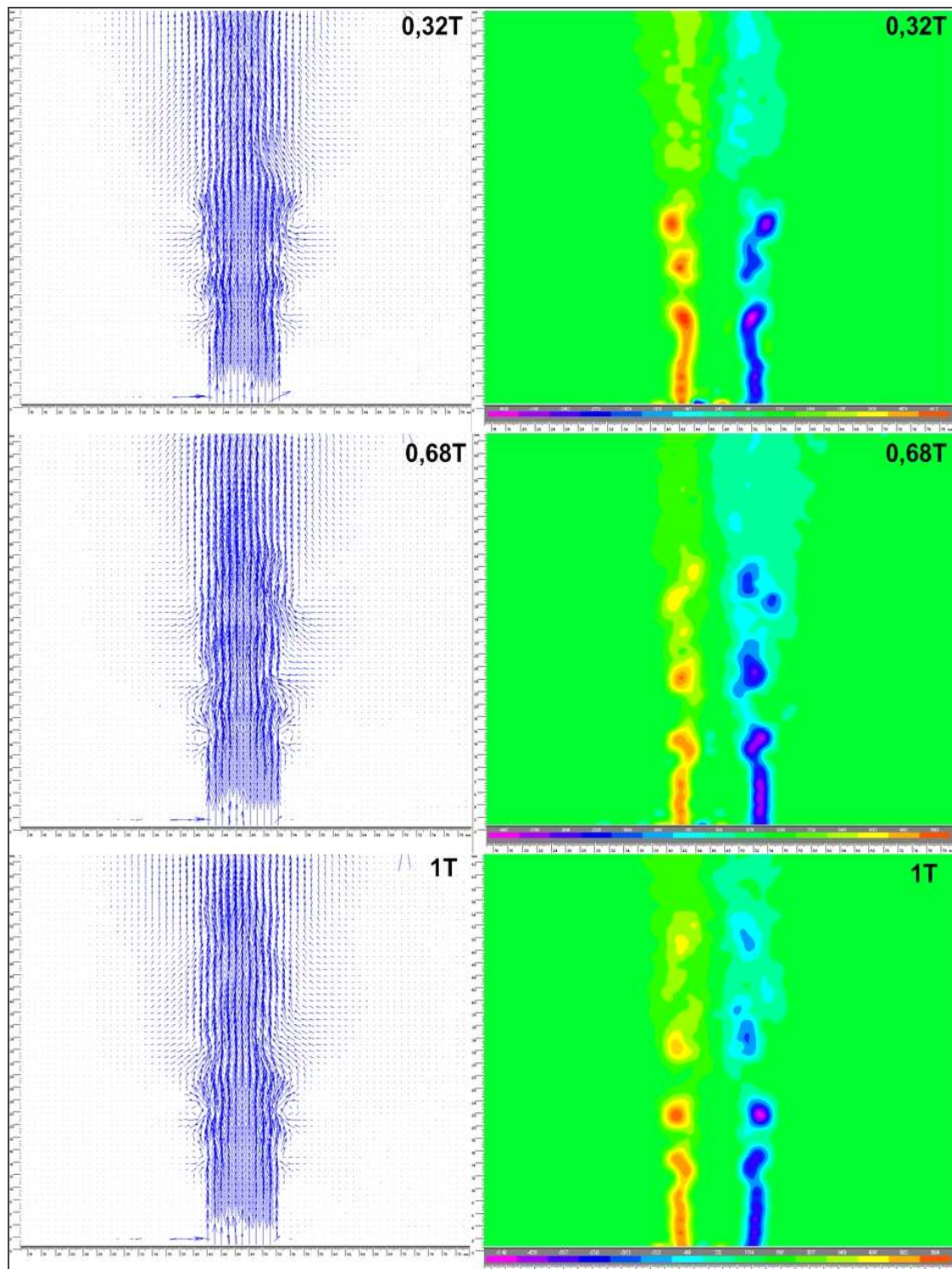
Výsledkem roztahování a stlačování proudění v ústí trysky je proudění zobrazené na obr. 6.3-2 a spolu s obr. 6.3-3 a obr. 6.3-4 ukazují vytváření dvou vírů po stranách proudění a zrychlení proudění v ose trysky mezi vzniklými víry. Kamera je umístěna kolmo na rovinu s reproduktory označenými číslicemi 1 a 2.



Obr. 6.3-2 Časový průběh proudění při módu C laminárního (nahore) a turbulentního proudění (dole) – na pozadí rychlostního profilu skalární mapa rychlostí

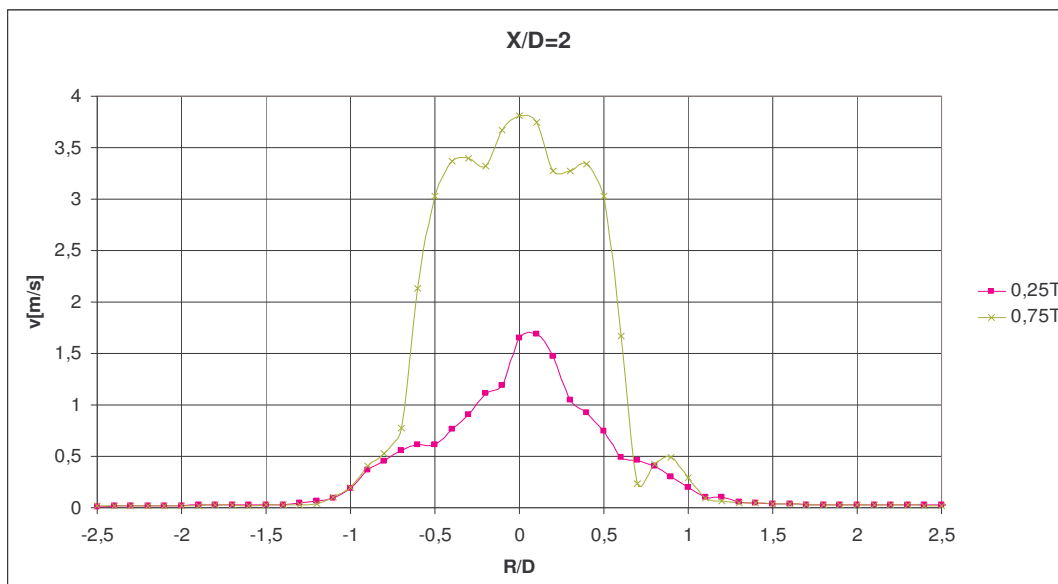


Obr. 6.3-3 Vývoj laminárního proudění módu C (vlevo vektorová mapa, vpravo mapa vířivosti)

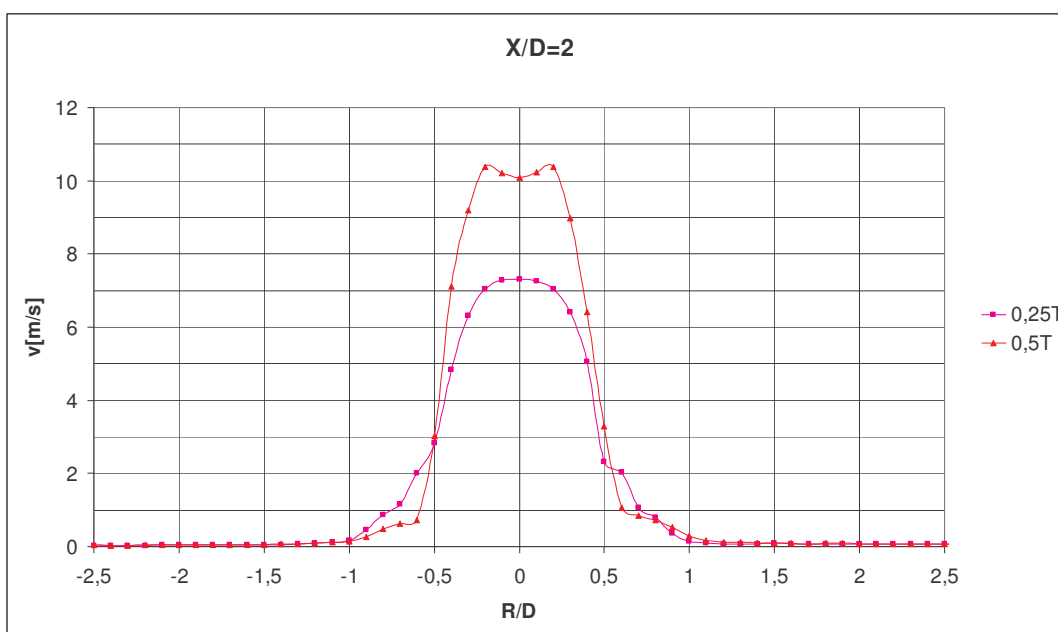


Obr. 6.3-4 Vývoj turbulentního proudění módu C (vlevo vektorová mapa, vpravo mapa vířivosti)

Z grafů 6.3-1 a 6.3-2 je také názorně vidět nárůst a pokles rychlostí proudění v tomto módu.



Graf 6.3-1 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu C



Graf 6.3-2 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu C

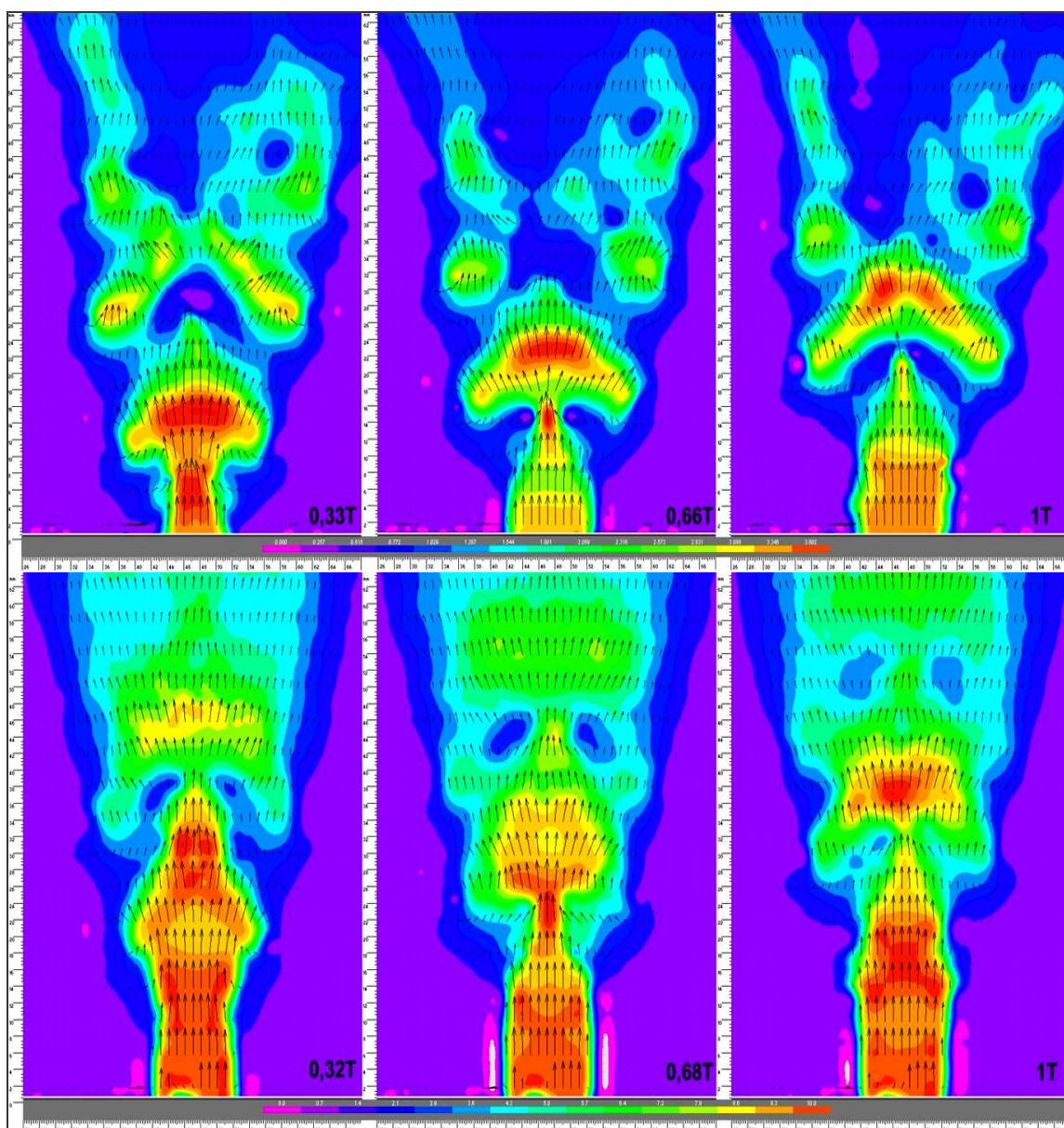
6.4 Múd D

Bitmapa na obr. 6.4-1 zobrazuje proudění vzniklé buzením reproduktorů podle módu D.



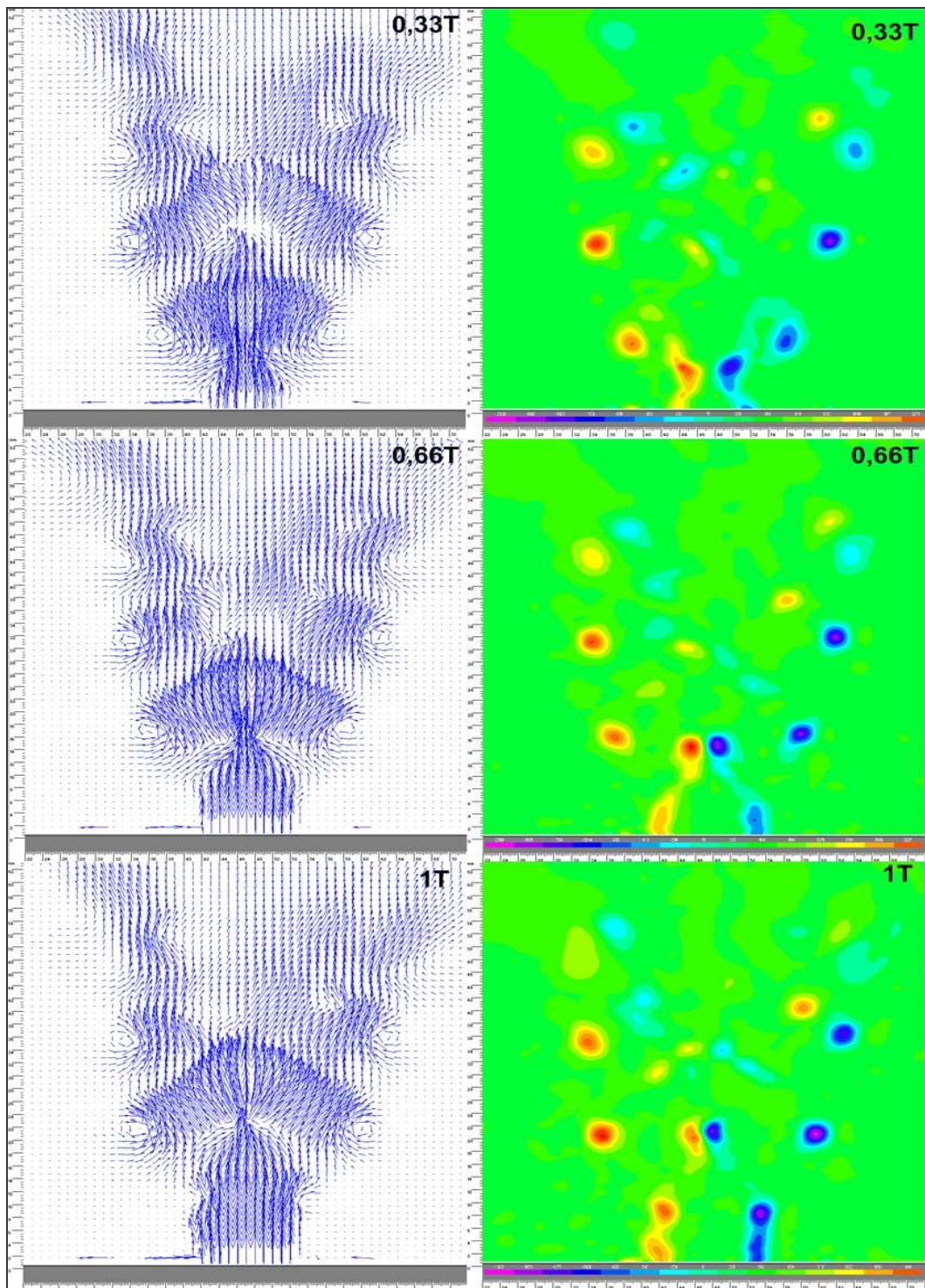
Obr. 6.4-1 Záznam proudění módu D v podobě bitmapy

Z obr. 6.4-2 je dobře znatelné, že při buzení reproduktorů v tomto módu dochází k rozdělení proudění na dva proudy a to tak, že levý proud je užší a má větší rychlost, pravý má naopak menší rychlost a je vlivem budících proudů roztažený.

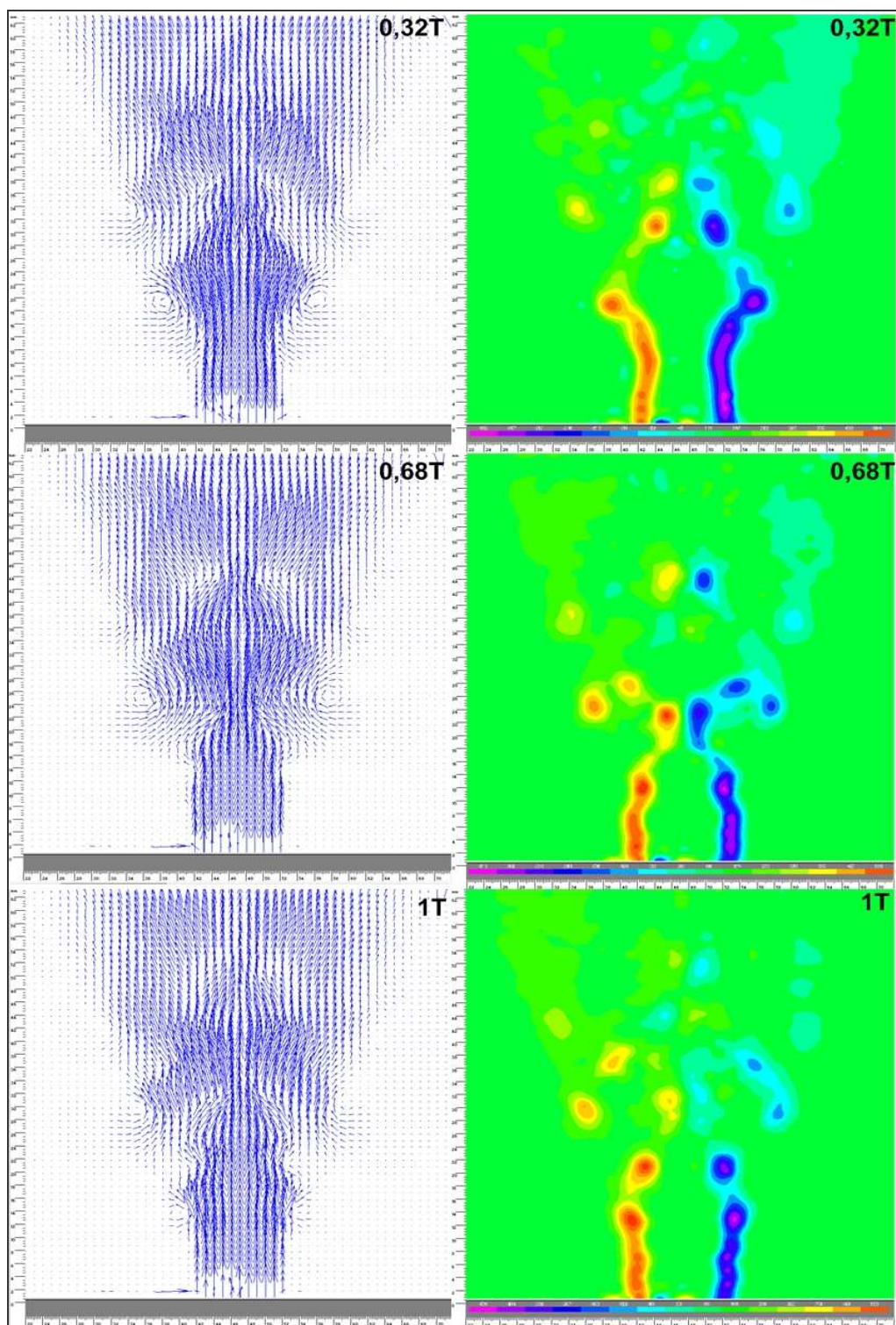


Obr. 6.4-2 Časový průběh proudění při módu D laminárního (nahore) a turbulentního proudění (dole) – na pozadí rychlostního profilu skalární mapa rychlostí

Struktura obou typů proudění a jejich vlivnost je zobrazena na obr. 6.4-3 a 6.4-4.

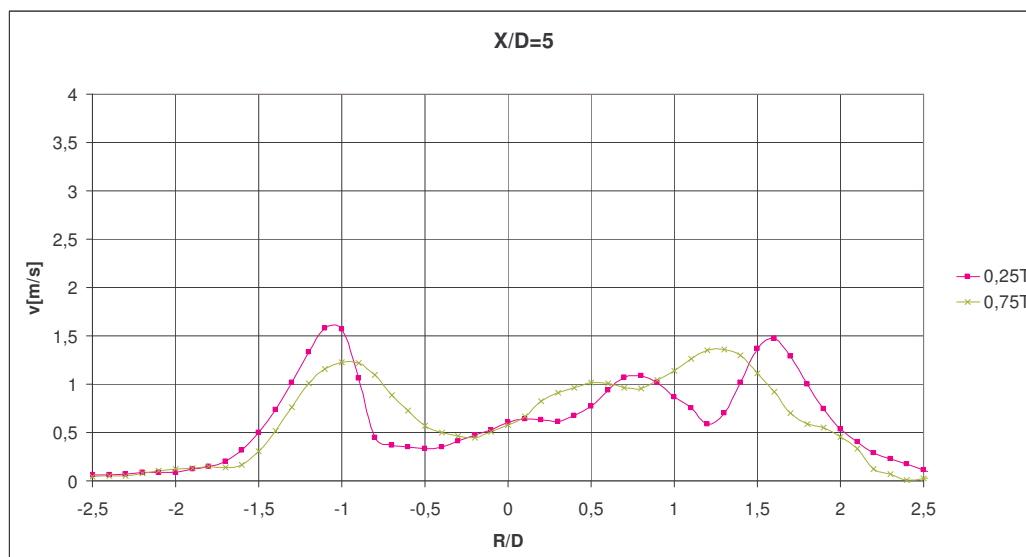


Obr. 6.4-3 Vývoj laminárního proudění módu D (vlevo vektorová mapa, vpravo mapa vířivosti)

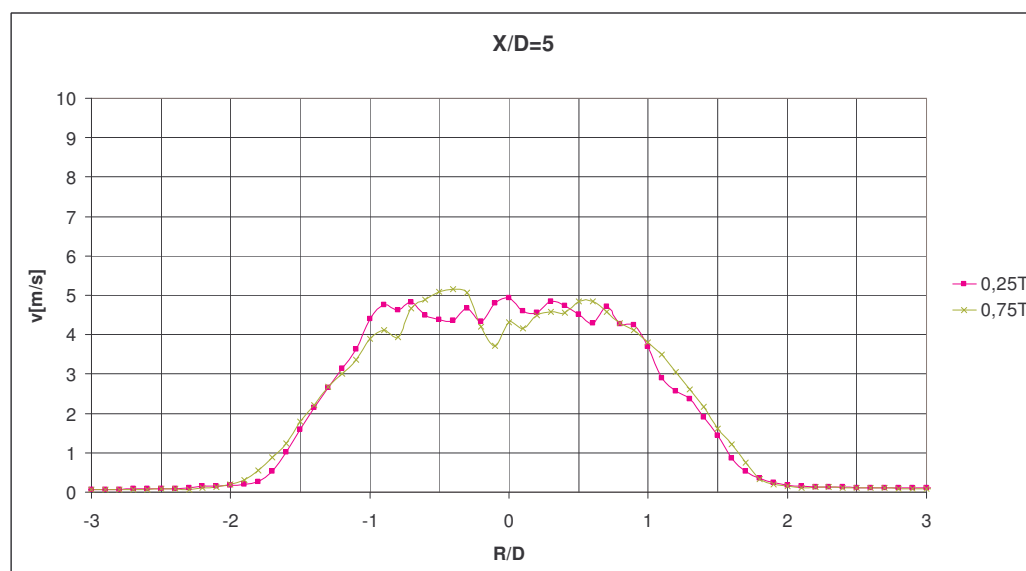


Obr. 6.4-4 Vývoj turbulentního proudění módu D (vlevo vektorová mapa, vpravo mapa vířivosti)

Grafy 6.4-1 znázorňuje rozdělení proudění na dva proudy a spolu s grafem 6.4-2 ukazují vyrovnnání rychlostí proudění během jedné periody.



Graf 6.4-1 Závislost velikosti rychlosti laminárního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu D



Graf 6.4-2 Závislost velikosti rychlosti turbulentního proudění na vzdálenosti od osy trysky módu D

7 Závěr

Práce se v teoretické části zabývá základním popisem syntetizovaných proudů a principem metody PIV, jejími limitami pro správné vyhodnocování naměřených dat a její vhodností pro měření nestacionárních proudových polí.

Na základě získaných poznatků o metodě PIV byla sestavena měřicí soustava schopná experimentálního výzkumu proudění, které bylo řízeno pulzujícími proudy a jejichž buzení využívalo akční členy pro vznik syntetizovaných proudů. Jako oscilující membrány akčních členů byly použity reproduktory.

Bylo řízeno laminární proudění (střední rychlost proudění $2,9 \text{ ms}^{-1}$, $Re=1600$ a frekvence buzení reproduktorů 82 Hz) a turbulentní proudění (střední rychlost proudění 9 ms^{-1} , $Re=5000$ a frekvence buzení reproduktorů 190 Hz) a bylo zkoumáno jejich chování pro různé režimy zapojení buzených reproduktorů.

Ačkoliv výkon potřebný pro buzení dvojice reproduktorů byl pouze $0,02 \text{ W}$, výsledky experimentu dokázaly, že pulzujícím prouděním přiváděným k ústí hlavní trysky je možné zásadním způsobem řídit jak laminární, tak i turbulentní proudění.

Výsledky experimentu byly zpracovány do podoby vektorových map, skalárních map rychlostí a vířivostí. Po exportu dat v numerické podobě také do grafů.

Dosažené výsledky experimentu byly prezentovány na XXI. sympoziu o laserové anemometrii v Holanech – Liticích.

K diplomové práci byla přiložena 2 CD s videosoubory, které v podobě vektorových map zobrazují vývoj proudění všech režimů buzení reproduktorů.

Seznam použité literatury

- [1] Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry, Springer, ISBN 3-540-63683-8
- [2] Kopecký, V. : Učební texty, 2001
- [3] Smith, B.L., Glezer, A.: The formation and evolution of synthetic jets, Phys. Fluids, Vol. 10 (1998) 2281-2297
- [4] Carter, J.E., Soria, J.: The evolution of round zero-net-mass-flux jets, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 472 (2002) 167-200
- [5] Holman, R., Utturkar, Y., Mittal, R., Smith, B.L., Cattafesta, L.: Formation Criterion for Synthetic Jets, AIAA Journal, Vol. 43 (2005), No. 10, 2110-2116
- [6] Gordon, M., Soria, J.: PIV measurements of a zero-net-mass-flux jet in cross flow, Experiments in Fluids, Vol. 33 (2002) No. 6, 863-872
- [7] Dantec Dynamics Inc.: FlowManager software and introduction to PIV instrumentation
- [8] Dančová, P., Trávníček, Z., Vít, T.: Syntetizovaný proud, MM Průmyslové spektrum, Vol. 3 (2007)
<http://www.mmspektrum.com/index.php?m=2&sub=5&rel=0703&idcl=070301>
- [9] Reynolds, W.C., Parekh, D.E., Juvet, P.J.D., Lee, M.J.D.: Bifurcating and Blooming Jets, Ann. Rev. Fluid Mech., (2003) 35:295-315
- [10] Jenčík, J., Volf, J. a kol.: Technická měření, České vysoké učení technické v Praze, Vydavatelství ČVUT, 2003
- [11] Dvořák, V., Šulc, J., Urbášek, J.: Technická měření – Návod na cvičení, Technická univerzita v Liberci, 2005, 55-012-05, ISBN 80-7083-917-1